



Faculté de technologie
Département de GENIE CIVIL



MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du diplôme
de MASTER**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux en génie civil

Présenté par :

HAMIDI IMADEDDINE

Thème :

**L'effet de l'utilisation des déchets de poudre de verre dans
la formulation du béton autoplaçant exposé à la haute
température**

Soutenu devant le jury composé de :

Mr. BELAGRAA Larbi	Professeur	Président
Mr CHIKOUCHE Mohamed Aziz	MCA	Examineur
Mme. DJEBRI Noura	MCA	Encadreur
Mr. RAHMOUNI Zine El Abidine	Professeur	Co-Encadreur

Promotion : 2024/2025.

REMERCIEMENT

Je remercie Allah, le Tout Puissant, le Miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je necessitais pour l'accomplissement de ce mémoire.

*Remerciement avant également, notre encadreur de projet de fin d'étude **Dr. DJEBRI NOURA** et Co-Encadreur **Pr. RAHMOUNI-Zine El Abidine**, pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité.*

En dernier Je remercie également tous les enseignants du département de Génie civil de l'université Mohamed Boudiaf - M'sila, qui ont participé à ma formation pendant tout mon cycle universitaire.

Merci.

DECICACE

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience
D'aller jusqu'au bout du rêve.

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents,
A mes frères,
A tous ceux qui m'aiment et qui m'ont soutenue
Tout au long de mon cursus.
A tous ceux qui voulaient assister à la soutenance
De ce modeste travail.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 01 : Généralités sur le béton auto plaçant	
1.1 Introduction	4
1.2 Définition de béton auto plaçant	4
1.3 Domaine d'utilisation des BAP	5
1.4 Les principaux constituants des BAP	6
1.5 Matériaux de base	6
1.5.1 Les granulats	6
1.5.2 Le ciment	7
1.5.3 L'eau de gâchage	7
1.5.4 Adjuvants chimiques	7
1.5.5 Les fillers	8
1.5.6 Les superplastifiants	8
1.6 Les avantages des bétons autoplaçants	9
1.7 Ouvrabilité des bétons	10
1.8 Caractérisation d'un béton auto plaçant	11
1.8.1 Essais de caractérisation à Etat frais	11
1.8.1.1 Essai évaluant la fluidité (étalement)	11
1.8.1.2 Essai de la boîte en L	12
1.8.1.3 Essai de stabilité au tamis	13
1.8.2 Essais de Caractérisation à l'état durci	14
1.8.2.1 Les essais de compression(NF EN 12390-3)	14
1.8.2.2 Les essais de flexion (NF EN 12390-5)	16
1.8.3 Formulation des bétons autoplaçant	17
1.8.3.1 Formulation des BAP	17
1.8.3.2 Méthode Française	17
1.8.3.3 Méthode japonaise	18
1.8.4 L'approche suédoise	19
1.8.5 Formulation par volume de pâte minimal	19
1.8.6 Formulation par optimisation du squelette granulaire	19
1.8.7 Méthode basée sur un plan d'expérience	19
1.9 Conclusion	20

Chapitre 02 : Valorisation des déchets

2.1	Introduction	22
2.2	Les déchets.....	22
2.3	Définition économique d'un déchet	22
2.3.1	Définition sociologique de "déchet"	23
2.3.2	Définition juridique de "déchet"	23
2.4	Les différents types de déchets	23
2.4.1	Déchets ultimes.....	23
2.4.2	Déchets inertes	24
2.4.3	Déchets dangereux	24
2.4.4	Déchets non dangereux des activités économiques	25
2.4.5	Les déchets industriels banals (DIB).....	25
2.4.6	Les déchets médicaux et pharmaceutiques	26
2.5	Gestion des déchets	26
2.6	Principes de gestion des déchets	26
2.7	Méthodes de gestion des déchets.....	27
2.7.1	L'enfouissement	27
2.7.2	L'incinération.....	27
2.7.3	La décharge contrôlée	27
2.7.4	Le compostage.....	28
2.8	Déchets utilisés comme granulats du béton	29
2.8.1	Laitier d'acier.....	29
2.8.2	Cendres volantes	29
2.8.3	Déchets de verre	29
2.8.4	Déchets de marbre	30
2.8.5	Déchets de démolition	31
2.8.6	Déchets de production de l'industrie du béton	32
2.8.7	Déchets plastiques	32
2.8.8	Ciment durci	32
2.8.9	Déchets de briques	33
2.9	Le recyclage	34
2.10	recyclage du verre.....	34
2.11	Le verre récupéré.....	35
2.12	Les verres	35

2.13	Structure du verre.....	36
2.14	Le verre en génie civil	37
2.15	Avantages économique et techniques « du béton de verre	37
2.15.1	L'avantage technique.....	37
2.15.2	Avantages économiques	38
2.16	la valorisation.....	38
2.16.1	Définition de la valorisation	38
2.16.2	La valorisation de la matière	39
2.17	Conclusion.....	39
3	Chapitre 03 : Béton autoplaçant exposé à la haute température.	
3.1	Introduction.....	42
3.2	Comportement au feu des structures en béton lors d'incendie.....	45
3.3	Evolution des propriétés physique du béton à haute température.....	45
3.3.1	Les modifications physico-chimiques dans le béton à haute.....	45
3.3.2	Dégradation de l'interface pâte-granulats	46
3.3.3	Evolution de la porosité	46
3.3.4	Evolution de la masse volumique	47
3.3.5	Evolution de la perméabilité.....	48
3.3.6	Perte de masse	48
3.4	Evolution des propriétés mécaniques avec la température.....	49
3.4.1	Résistance en compression.....	49
3.4.2	Résistance en traction	51
3.4.3	Module d'élasticité.....	52
3.5	Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température	53
3.5.1	La conductivité thermique	53
3.5.2	Chaleur spécifique.....	54
3.5.3	Diffusivité thermique.....	55
3.6	Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé	56
3.7	Paramètres favorisant l'instabilité thermique	57
3.8	Déformation thermique du béton à hautes températures	58
3.9	Conclusion	59

Chapitre 04 : Caractéristiques des matériaux utilisés

4.1 Introduction.....	61
4.2 Caractérisations des matériaux.....	61
4.3 Analyse granulométrique.....	61
4.4 Equivalent de sable NF EN 993-8.....	65
4.4.1 Equivalant de sable visuel (E.S.V)	65
4.4.2 Equivalent de sable piston (E.s.p).....	66
4.5 Caractéristiques physiques du sable et Gravier	67
4.5.1 La masse volumique absolue sable.....	67
4.5.2 La masse volumique apparente sable.....	68
4.5.3 La masse volumique apparente Gravier.....	69
4.5.4 La masse volumique absolue du gravier.....	69
4.6 VERRE	70
4.7 Adjuvant(N O V S U P E R L O W)	71
4.8 Le ciment.....	71
4.8.1 caractéristiques de ciment CEM 42.5	71
4.8.1.1 caractéristiques physiques du ciment utilities EN191-1(2002).....	72
4.9 Conclusion.....	73

Chapitre 05 : Techniques Expérimentales desBAP

5.1 INTRODUCTION	75
5.2 Calcul des constituants d'un BAP par la méthode AFGC.....	75
5.3 Procédure de fabrication des éprouvettes	78
5.4 Équipements utilisés	78
5.5 Essais de caractérisation du béton auto plaçant à l'état frais	80
5.5.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (NF EN 12 350-8]	80
5.5.1.1 Matériel utilisé	
5.5.1.2 Mode opératoire	
5.5.2 Essai de la boîte en « L ».....	81
5.5.3 Stabilité au tamis.....	81
5.5.4 La masse volumique	82
5.6 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci.....	83

5.6.1	Essai compression (NF EN 206-1].....	83
5.6.2	Essais de traction par flexion	84
5.7	Confection des éprouvettes	85
5.7.1	Type et tailles des moules	85
5.7.2	Conservation des éprouvettes.....	85
5.8	Conclusion.....	86

Chapitre 06 : Résultats et Analyses

6.1	Introduction.....	88
6.2	Les formulations des bétons étudiés.....	88
6.3	Présentation des résultats.....	88
6.3.1	Résultats des essais à l'état frais.....	88
6.4	Les essais de caractérisation des bap a l'état durcis	92
6.4.1	Résistance à la compression.....	95
6.4.2	Résistance à la traction	96
6.5	Perte de masse	97
6.6	Conclusion.....	100
	CONCLUSION GENERAL.....	102
	Références bibliographique	103

Liste des Figures

Figure 01 : Comparaison de la structure d'un BAP et d'un BO	5
Figure 02 : (a) Pâte de ciment non adjuvante, (b) Pâte de ciment additionnée d'un Superplastifiant	9
Figure 03: Essai d'étalement au cône d'Abram's (slump flow).	12
Figure 04 : Essai d'étalement au cône d'Abram's selon la norme NF EN 12350-8	12
Figure 05 : - Représentation schématique de l'essai à la boîte en L	13
Figure 06 : Représentation de l'essai de stabilité au tamis	14
Figure 07 : Mesure de la résistance à la compression des (10*10*10) cm.....	15
Figure 08: Mesure de la résistance à la flexion des (7*7*28) cm.....	16
Figure 09 : Déchets inertes.....	24
Figure 10 : Photo d'une Gestion des déchets.....	26
Figure 11 : Photo d'une décharge contrôlée.....	28
Figure 12 : Compostage de déchets organiques.....	28
Figure 13: Déchets de verre.....	30
Figure 14 : Déchets de marbres.....	31
Figure 15 : Le verre récupéré.....	35
Figure 16 : Représentation schématique de la structure du verre de silice.....	36
Figure 17 : Incendie du Tunnel du Mont Blanc, en France, durée de 53heures (24 au 26 Mars ; 1999).....	41
Figure 18 : À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie.....	43
Figure 19 : Exemples de désordres de différentes classes, a/ écaillage superficiel, b/disparition du béton d'enrobage des armatures, c/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de l'épaisseur de béton atteint 50%.....	44
Figure 20 : Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température.....	47
Figure 21 : Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température.....	47
Figure 22 : Évolution de la perméabilité des bétons BO et BHP en fonction de la Température.....	48
Figure 23: Pertes de masse des bétons déterminées durant le chauffage de 20°C à 600°C à la vitesse de 1°C/min. Les points indiquent la valeur de la teneur en eau obtenue par séchage à 105°C.....	49
Figure 24 : Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP.....	50
Figure 25 : Evolution de la résistance à la traction en fonction de la température.....	51
Figure 26: Evolution de la résistance à la traction en fonction de la température.....	52
Figure 27 : Conductivité thermique du béton en fonction de la température.....	53
Figure 28: Influence des types de granulats sur la chaleur massique de bétons.....	54
Figure 29 : Variation de la diffusivité thermique de différents types de béton avec la température.....	55
Figure 30 : Illustration du mécanisme d'éclatement.....	56
Figure 31 : Expansion thermique des granulats.....	57
Figure 32 : Un vibro- électrique. Tamis.....	61
Figure 33: courbe d'analyse granulométrique de sable djamaa.....	62
Figure 34: Courbe analyse granulométrique de gravier (3/8).....	63
Figure 35: Courbe Analyse granulométrique du gravier (8/16).....	64

Figure 36: Principe de l'équivalent de sable.....	66
Figure 37 : Ciment portland CEM 42.5R.....	72
Figure 38: Appareillage de laboratoire.....	79
Figure 39: Essai d'étalement au cône d'Abram's.....	81
Figure 40 : Principe de l'essai stabilité de tamis sur BAP.....	82
Figure 41: La masse volumique.....	83
Figure 42: Essai compression :a) machine et éprouvette, b) éprouvette destructeur.....	83
Figure 43: essai de traction et flexion et éprouvette.....	84
Figure 44 : Les moules, utilisés.....	85
Figure 45 : Type des éprouvettes utilisés :a) cubique , b) prismatique.....	85
Figure 46 : L'étalement en fonction du type de béton.....	89
Figure 47 : Taux de remplissage en fonction du type de béton.....	90
Figure 48 : Stabilité au tamis en fonction du type de béton.....	91
Figure 49 : Evolution de la Résistance à la compression en fonction du type du béton exposé à la haute température.....	95
Figure 50 : Evolution de la Résistance à la traction en fonction du type du béton expose à la haute température.....	96
Figure 51 : Évolution de la perte de masse des BAP en fonction des températures.....	97
Figure 52 : Variation du poids du béton avant et après immersion dans l'eau pendant 30 jours.....	98
Figure 53 : Evolution de poids en fonction du type du béton exposé à la haute température.....	99

Liste des Tableaux

Tableau 01 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP et les moyens de mise en œuvre.	10
Tableau 02 : Classification des dégradations d'ouvrage en béton par incendie.....	43
Tableau 03: les principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température.....	45
Tableau 04 : Analyse granulométrique du sable de djamaa.....	62
Tableau 05: Analyse granulométrique de gravier (3/8).....	63
Tableau06 : Analyse granulométrique de gravier (8/16).....	64
Tableau 07: La classification de la nature sable en fonction d'équivalent de sable (E.S).....	67
Tableaux 08 : Equivalent de sable.....	67
Tableau 09: Masse volumique absolue du sable de djamaa.....	68
Tableau 10: La masse volumique apparente à l'état lâche VR=1000 ml.....	68
Tableaux11 : la masse volumique apparente du gravier	69
Tableaux 12 : la masse volumique absolue du gravier.....	70
Tableau 13 : Composition du verre.....	70
Tableau 14: Masse volumique absolue du verre	70
Tableau 15 : Masse volumique apparente du verre	71
Tableau 16: Caractéristique de l'adjuvant« NOV SUPERLOW ».....	71
Tableau 17 : Propriétés de « NOV SUPERLOW » à l'état frais et durci.....	71
Tableau 18 : Les compositions chimiques du CEMII/B 42.5.....	71
Tableau 19: Caractéristiques Techniques du CEM 42,5.....	72
Tableaux 20 : Caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage.....	73
Tableau 21: Composition d'une mètre cube de béton autoplaçant.....	77
Tableaux 22 : Résultats des essais à l'état frais.....	89
Tableaux 23 : Résistance à la compression et la traction par flexion avec le poids BAP 0%V.....	92

Tableaux 24 : Résistance à la compression et la traction par flexion avec le poids BAP 5% V.....	93
Tableaux 25 : Résistance à la compression et la traction par flexion avec le poids BAP 10% V.....	94

Notations

BAP	Béton autoplaçants	M₁	Poids de récipient
BO	Béton ordinaire	C	La compacité en (%)
R_c	Résistance à la compression en (MPa).	e	L'indice des vides
F	Charge maximal en (KN)	P	Porosité en (%)
S	Surface de l'éprouvette en (cm ²)	W	Teneur en eau en (%)
R_t	Résistance à la traction en (MPa)	L_A	Coefficient de Los Angles (%)
I_s	L'indicesclérométrique	FS	Fumée de silice
D_{max}	Dimension des granulats	FC	Fillers calcaire
ρ_{abs}	Masse volumiqueabsolue	PM	Poudre de marbre
ρ_c	Masse volumique à l'état compact	SP	superplastifiants
ρ_{app}	La masse volumique apparente (Kg/m ³)	C	Ciment
V	Vitesse de propagation des ondes en(m/s)	S	Sables
BAP	Béton autoplaçants	G	gravier
II	L'indice de ségrégation	M_f	Module de finesse
R_c	Résistance à la compression en (MPa).	E_{sv}	Equivalent de sable visuel en (%)
F	Charge maximal en (KN)	E_{sp}	Equivalent de sable piston en (%)
S	Surface de l'éprouvette en (cm ²)	A	Absorptiond'eau
R_t	Résistance à la traction en (MPa)	P_{eau}	Porosité à l'eau
I_s	L'indicesclérométrique	ρ_{abs}	Masse volumiqueabsolue
E_d	Module d'élasticité dynamique en(MPa)	h₁	Hauteur (sable + flocculat)
ρ	La masse volumique du béton en (Kg/m ³)	h₂	Hauteur du sable en (cm)
V	Vitesse de propagation des ondes en (m/s)	R_c	Refuscumules des tamis
t	Le temps en (μs)	NF	Normefrançaise
E/C	Rapport massique Eau sur Ciment	EN	Normeeroupiéne
G/S	Rapport sable sur gravier	K	Clinker portland
R_c	Refuscumlé	CSH	Silicate de calcium hydrate
M_s	Poids du sable sec en (g)	Ca(OH)₂	La portlandite
M_h	Poids du sable humide en (g)	CaCO₃	Carbonate de Calcium ou Calcaire
V_r	Volume de recipient (cm ³)	NDT	Essai non-destructifs
M₂	Poids de l'ensemble(granat + récipient)	ED	Essaidestructifs

Résumé

L'utilisation des Bétons autoplaçant (BAP) s'est considérablement développée au cours des dernières années et une attention grandissante est portée à l'étude de leurs propriétés mécaniques et rhéologiques. Les déchets industriels dégagent actuellement constituant une source potentielle de problèmes environnementaux et économique.

L'incorporation des déchets dans la composition du béton autoplaçant (BAP) est un intérêt qui mérite d'être étudié.

L'objectif de ce travail, c'est la valorisation des déchets de verre en les utilisant comme fillers dans le béton autoplaçant. Pour réduire l'impact environnemental et améliorer le comportement mécanique du béton à la flexion, et à la compression, ainsi que l'étude de leurs comportements vis-à-vis des hautes températures du point de vue caractéristique mécanique.

Mots clés : Béton autoplaçant, Valorisation des déchets, Poudre de verre, Etat frais, Etat durci.

ملخص

شهد استخدام الخرسانة ذاتية التوضع (BAP) نموًا ملحوظًا في السنوات الأخيرة، ويتزايد الاهتمام بدراسة خصائصها الميكانيكية والريولوجية. تُشكل النفايات الصناعية حاليًا مصدرًا محتملاً للمشاكل البيئية والاقتصادية. يُعدّ دمج النفايات في تركيب الخرسانة ذاتية التوضع (BAP) أمرًا ذا أهمية تستحق المزيد من الدراسة.

يهدف هذا البحث إلى استعادة نفايات الزجاج باستخدامها كحشوات في الخرسانة ذاتية التوضع. ويهدف هذا البحث إلى تقليل الأثر البيئي وتحسين السلوك الميكانيكي للخرسانة في حالات الثني والضغط، بالإضافة إلى دراسة سلوكها تجاه درجات الحرارة المرتفعة من منظور الخصائص الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ذاتية التوضع ، استعادة النفايات، مسحوق الزجاج، الحالة الطازجة، الحالة المتصلبة.

Abstract

The use of self- compacting concrete (BAP) has grown considerably in recent years, and increasing attention is being paid to the study of its mechanical and rheological properties. Industrial waste currently generates a potential source of environmental and economic problems. The incorporation of waste into the composition of self- compacting concrete (BAP) is an interest that merits further study.

The objective of this work is to recover glass waste by using it as fillers in self- compacting concrete. This research aims to reduce the environmental impact and improve the mechanical behavior of concrete in flexure and compression, as well as to study its behavior with respect to high temperatures from a mechanical characteristic perspective.

Keywords: Self-compacting concrete, waste recovery, glass powder, fresh state, hardened state.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

Le béton autoplaçant (**BAP**) est un matériau cimentaire innovant capable de s'écouler et de se compacter sous la seule action de la gravité, sans vibration mécanique. Conçu pour améliorer la qualité, la durabilité et la rapidité de mise en œuvre, il se révèle idéal lorsque l'accessibilité du coffrage est limitée ou que des formes complexes doivent être remplies sans vides.

Le BAP se distingue par une (**fluidité élevée**), une (**stabilité suffisante**) empêchant la ségrégation, et une (résistance mécanique) adaptée aux exigences structurelles. Ces performances résultent d'une formulation précise (**ciment, eau, granulats, fines**) et de l'emploi d'adjuvants spécifiques, notamment des super-plastifiants et des agents de viscosité.

Parmi les principaux avantages, on note la réduction du bruit de chantier (**absence de vibration**), le gain de temps de mise en place, la qualité supérieure des parements, la diminution de la main-d'œuvre et l'amélioration de la sécurité. En contrepartie, le coût des matières premières et la nécessité d'un contrôle strict de la formulation représentent des défis techniques et économiques.

Le déploiement du BAP a ainsi transformé les pratiques de l'industrie de la construction, permettant la réalisation d'ouvrages plus complexes, plus durables et plus efficaces.

Le (**recyclage**) consiste à traiter des déchets (**industriels ou ménagers**) en fin de vie pour réintroduire leurs matériaux dans de nouveaux produits. Métaux, plastiques, cartons, verre, gravats, etc., peuvent ainsi être valorisés.

Le recyclage du verre et son incorporation comme (**additif majeur dans le BAP**) constitue une avancée majeure pour la construction durable. L'ajout de verre recyclé améliore la durabilité et la dureté du béton tout en réduisant l'impact environnemental lié à l'élimination des déchets verriers. Cette substitution diminue l'utilisation de ressources naturelles, abaisse les coûts de production et s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire et d'objectifs de développement durable.

L'objectif de ce travail est de démontrer l'intérêt d'employer des déchets ménagers en l'occurrence des bouteilles en verre dans le BAP. J'ai suggéré proposé l'usage d'une (**poudre de**

verre) (< **80 μm**) obtenue par broyage, et étudié son effet sur les propriétés du BAP.

Trois pourcentages d'ajout de matière à la masse de ciment ont été examinés : **(0 %, 5% et 10%)** .

Cette recherche vise à préserver les ressources naturelles, protéger l'environnement et améliorer l'efficacité énergétique. De nombreuses études récentes explorent déjà la reconversion des déchets en constituants des bétons autoplçants, et notre contribution s'inscrit dans cette démarche. [1] [2]

Ce mémoire est reparti en six chapitres comme suit:

Le premier chapitre : Généralités sur le béton autoplçant

Le deuxième chapitre : Valorisation des déchets

Le troisième chapitre : Béton autoplçant exposé à la haute température.

Le quatrième chapitre : Caractéristiques des matériaux utilisées

Le cinquième chapitre : Techniques Expérimentales

Le sixième chapitre : Résultats et Analyses.

Enfin, En conclusion, l'étude expérimentale conduite a permis d'élaborer des formulations de BAP performantes, en précisant l'influence des super-plastifiants sur les propriétés du béton. Ces résultats confirment le potentiel du verre recyclé pour améliorer simultanément la performance et la durabilité environnementale des bétons autoplçants.

Chapitre 01:

Généralités sur le béton autoplaçant

1.1 Introduction :

Cette section propose une vue d'ensemble approfondie du béton autoplaçant (BAP) en tant que matériau de nouvelle génération. Il expose d'abord l'historique et en précise la définition, puis synthétise la nature des constituants entrant dans sa formulation ainsi que ses performances aux états frais et durci. Enfin, elle met en exergue les avancées technologiques et les bénéfices associés à l'emploi du BAP.

Le BAP s'impose aujourd'hui comme une réponse stratégique pour réduire la pénibilité des tâches sur chantier : d'une rhéologie extrêmement fluide, il se met en place par gravité, sans vibration, épousant parfaitement la géométrie du coffrage.

Sa composition, plus élaborée que celle d'un béton conventionnel, intègre en général six à sept éléments : ciment, eau, sable, granulats, poudre de verre, super-plastifiant de haute performance et, le cas échéant, agent de viscosité pour stabiliser le mélange.

Pour assurer un écoulement optimal à travers l'armature, la dimension maximale du gravillon est limitée à 16 mm, garantissant la capacité du béton à traverser les mailles du ferrailage sans blocage ni ségrégation. [1] [4]

1.2 Définition de béton auto plaçant :

Ces bétons sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages très ferrailés.

Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'auto-plaçant que si le matériau durci final présente des propriétés homogènes (pas de ségrégation) et présente de très bonne performance à court et à long terme. [4]

Les propriétés caractéristiques de BAP sont :

- fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation.
- Des aérations du béton pendant son écoulement.
- Excellente aptitude au béton homogène en présence de réservations d'incorpores et de ferrailages denses. [5]

Pour acquérir ses propriétés, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (**figure 01**). En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie. [1] [4] [5]

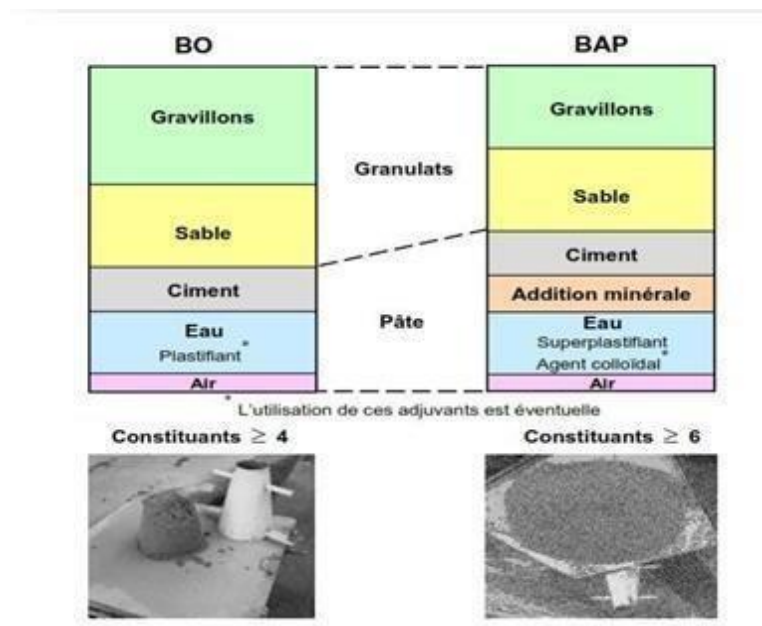


Figure 01. : Comparaison de la structure d'un BAP et d'un BO [1]

1.3 Domaine d'utilisation des BAP :

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [6]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation des structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- Densités de ferrailage importantes.
- Formes et géométries complexes : voiles, courbes.
- Voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts.
- Voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
- Exigences architecturales et qualité de parement particulière. [1]

1.4 Les principaux constituants des BAP :

Les constituants d'un béton autoplaçant (BAP) se distinguent sensiblement de ceux d'un béton ordinaire (BO), tant par leur nature que par leurs proportions. Compte tenu du procédé particulier de mise en place, on peut regrouper les composants du BAP en plusieurs grandes catégories : les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques. [1]

1.5 Matériaux de base :

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton.

Ils sont qualifiés ainsi puis qu'ils sont historiquement les seuls constituants des bétons de nos ancêtres et parce qu'ils ont toujours les plus grosses proportions relatives dans le mélange de BAP.

1.5.1 Les granulats :

Les granulats roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Les granulats roulés en vrac présentent un plus petit volume de vide inter granulaire, ce qui nécessite une plus faible quantité de pâte de ciment pour le remplir. La flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est cependant meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique masse identique. Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm .L'expérience a néanmoins montré qu'il était également possible d'utiliser des granulats de diamètre maximal différent. Le mélange pour béton (granularité) est caractérisé par une teneur. Levée en sable et en éléments fins. Le passant au tamis de 5 mm devrait être idéalement compris entre 38 et 42%. De même, la proportion de farines (0,125mm) ne devrait pas être trop faible, l'optimum situ entre 4 et 8%. Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment. Afin d'assurer une bonne stabilité du BAP (éviter toute ségrégation), il est recommandé de choisir un sable spécialement optimisé, au besoin recomposé à partir de plusieurs fractions. [2] [6]

1.5.2 Le ciment :

En théorie, l'ensemble des ciments normalisés peut être employé pour la production de BAP. Néanmoins, le recours à un ciment Portland pur (constitué exclusivement de clinker) offre une plus grande flexibilité pour ajuster et maîtriser précisément les dosages des additions minérales incorporées. [1]

1.5.3 L'eau de gâchage :

Toute eau du réseau public d'eau potable convient pour la fabrication de béton Autoplaçant. Les eaux recyclées de gâchage et de lavage ne conviennent que sous certaines conditions restrictives en raison d'éventuels effets indésirables sur les propriétés du béton.

Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable la viscosité et la compacité d'autoplaçant du béton, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants. [1]

1.5.4 Adjuvants chimiques :

Pour atteindre l'extrême fluidité requise par les bétons autoplaçants (BAP), l'emploi d'adjuvants super-plastifiants de dernière génération principalement à base de polycarboxylates s'avère incontournable. Ces adjuvants autorisent une réduction substantielle du rapport eau/liant tout en modulant la rhéologie du mélange, notamment sa viscosité.

L'efficacité de ces super-plastifiants reste néanmoins tributaire de la nature du ciment et des additions minérales, en raison des interactions de compatibilité chimique. Une incompatibilité pourrait compromettre les performances visées ; il convient donc de vérifier systématiquement cette synergie.

En outre, de fortes teneurs en adjuvants peuvent retarder sensiblement le début de prise, imposant un ajustement précis des dosages. Pour améliorer la stabilité du mélange et limiter la ségrégation (ressuage ou descentes des gros granulats), l'ajout d'adjuvants stabilisants est préconisé ; ceux-ci confèrent au BAP une moindre sensibilité aux variations du rapport eau/ciment équivalent et assurent une homogénéité accrue. [1]

Par conséquent, la sélection des adjuvants doit se fonder sur des essais préliminaires spécifiques à chaque système liant–addition. À défaut, un sur-dosage important peut être nécessaire, risquant d’entraîner un raidissement prématuré du mélange et la perte des propriétés recherchées du béton autoplaçant.

1.5.5 Les fillers :

Les fillers sont des matériaux pulvérulents très fins, dont la taille des particules ne dépasse généralement pas 80 micromètres. Le terme « filler » provient de l’anglais *to fill*, signifiant « remplir », en référence à leur fonction principale dans les mélanges cimentaires.

Ils sont le plus souvent issus du broyage de roches calcaires ou silico-calcaires, bien que la notion de filler soit plus large. Selon la norme française NA EN 933-3 (2002), les fillers sont définis comme suit :

« Produit obtenu par le broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitier, bentonite, cendres volantes, etc.), naturelles ou artificielles, agissant principalement, par leur granulométrie spécifique, sur certaines propriétés physiques du ciment telles que l’amélioration de la maniabilité, la diminution de la perméabilité et de la capillarité, ainsi que la réduction du risque de fissuration. »

Sur le plan chimique, les fillers sont qualifiés d’inertes lorsqu’ils ne réagissent pas avec les composants du ciment en présence d’eau. Dans ce cas, ils sont considérés comme inactifs, n’apportant pas de contribution réactive au processus d’hydratation. Toutefois, même sans action chimique directe, leur effet physique sur les propriétés du béton est significatif, notamment par l’optimisation du squelette granulaire et la densification de la matrice cimentaire. [2]

1.5.6 Les superplastifiants :

Les superplastifiants sont des agents réducteurs d’eau à haute performance, généralement disponibles sous forme liquide. Ils sont constitués de longues chaînes moléculaires organiques de masse moléculaire élevée, leur conférant une grande efficacité de dispersion.

Parmi les superplastifiants les plus utilisés, on trouve les sels de sodium ou de calcium du polynaphtalène sulfoné, ainsi que les sels de sodium de la polymélamine sulfonée. Plus récemment, des copolymères à base d’acrylate-esters ou des polyacrylates ont été introduits sur le marché, offrant des performances améliorées, notamment en termes de conservation de l’ouvrabilité.

Le mécanisme d'action des superplastifiants est particulièrement complexe et peut être décrit comme suit :

En présence d'un milieu polaire tel que l'eau, les particules de ciment, dont les surfaces portent des charges électrostatiques opposées (positives et négatives), ont tendance à s'agglomérer sous forme de floccs (floculation). Ce phénomène entraîne la rétention d'une partie de l'eau de gâchage sous forme d'**eau captive**, piégée entre les grains de ciment. Cette eau immobilisée n'est alors plus disponible pour assurer la maniabilité du béton.

Les superplastifiants, en s'adsorbant à la surface des grains de ciment, perturbent ce phénomène de floculation. En neutralisant les charges opposées et en induisant une charge électrostatique homogène sur l'ensemble des particules, ils provoquent des forces de répulsion entre les grains. Cette répulsion entraîne la dispersion des particules de ciment et la libération de l'eau captive. Cette eau redevient alors disponible pour assurer la lubrification du mélange, ce qui se traduit par une amélioration significative de la maniabilité du béton. [1]

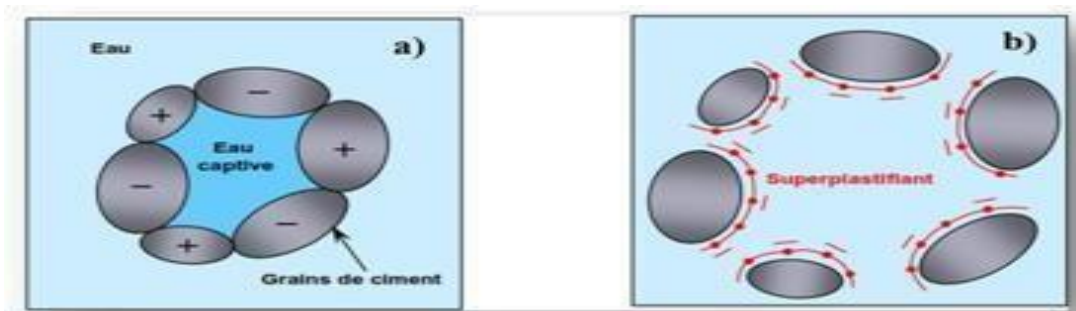


Figure 02 : (a) Pâte de ciment non adjuvante, (b) Pâte de ciment additionnée d'un Superplastifiant [7]

1.6 Les avantages des bétons autoplaçants :

Les BAP entraînent de nombreux avantages, on cite :

a) Avantages techniques :

- Facilité et rapidité de la mise en œuvre du béton
- Réalisation d'éléments de forme complexe
- Bétonnage en milieux fortement ferrailés

b) Avantages économiques :

- Réduction du coût de main-d'œuvre et du temps de bétonnage
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

c) Avantages écologiques :

- Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).
- Diminution de la quantité de CO2 émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP). [2]

1.7 Ouvrabilité des bétons :

Un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés précitées, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires (fluidité et résistance à la ségrégation). Pour résumer, nous présentons dans le tableau 01, les propriétés des BAP, les moyens pour les caractériser et les actions entreprises pour leur mise en œuvre. [8]

Tableau 01 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP et les moyens de mise en œuvre. [8]

Propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Actions à mener dans la formulation
Remplissage (fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte
	Optimisation de la pâte	Utilisation de superplastifiants
		Optimisation du rapport E/C
Résistance à la Ségrégation	Résistance à la Ségrégation	Utilisation de matériaux de grande surface granulaire
	Réduction de la séparation de phases	Utilisation d'agents de viscosité
		Réduction du rapport E/C
Capacité de passage	Réduction de blocage des Granulats	Réduction de la taille maximale des granulats
		Réduction de la taille maximale des granulats ainsi que le volume granulaire

1.8 Caractérisation d'un béton auto plaçant :

1.8.1 Essais de caractérisation à Etat frais :

1.8.1.1 Essai évaluant la fluidité (étalement) :

Les bétons auto plaçant formulés doivent satisfaire plusieurs tests normalisés [9-10-11] qui permettent de caractériser leurs principales propriétés. Les valeurs préconisées par la norme

[NF EN 206 – 9]. [12]

- La mobilité du béton auto plaçant en milieu non confiné, est un essai réalisé pour la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (Slump flow, SF). Cet essai est complété par la mesure du temps d'étalement pour un diamètre défini de 500 mm (T500) selon la norme [NF EN 12350 – 8]. [9].
- La résistance à la ségrégation du béton auto plaçant est exprimée par l'essai de stabilité au tamis selon la norme [NF EN 12350 – 11]. [11].
- La mobilité du béton auto plaçant en milieu confiné, est réalisé par l'essai du taux de remplissage dans la boîte en L (PL), selon la norme [NF EN 12350 – 10]. [10].
- Deux autres essais non normalisés, comme paramètres rhéologiques ont été choisis: la viscosité (μ) selon le modèle de Sedran [13] et le seuil de cisaillement (τ) selon la méthode de la boîte LCPC [14] décrites successivement en annexes 2et 3. Chaque essai est reproduit trois fois sur trois gâchées différentes de mêmes compositions

Pour la détermination de l'étalement (SLUMP FLOW) on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (≥ 800 par 800 mm), puis il est rempli de BA. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue qui devrait être comprise entre 600 et 800 mm [HOLCIM].

Pour l'AFGC les valeurs ciblées d'étalement sont généralement fixées dans la fourchette 60 à 75 cm. Il est possible aussi de mesurer le temps d'écoulement du béton pour atteindre un étalement de 50 cm (noté T50) ce qui donne un indice sur la viscosité d'un mélange de béton.

Les figures suivantes représentent d'une façon claire l'essai de l'étalement.

Mesure d'étalement au cône d'Abrams

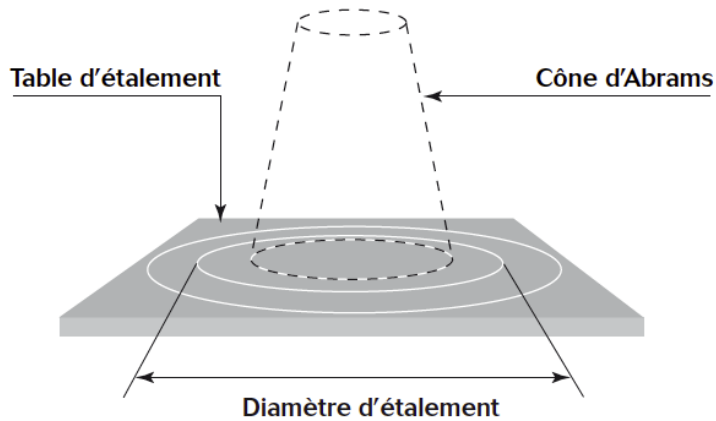


Figure 03: Essai d'étalement au cône d'Abram's (slump flow). [20]



Figure 04 : Essai d'étalement au cône d'Abram's selon la norme **NF EN 12350-8**. [20]

1.8.1.2 Essai de boîte en L : [NF EN 12350 – 10]

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.

Le mode opératoire est exprimé d'après l' [AFGC] comme suit :

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage $H2/H1$.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation. [10].

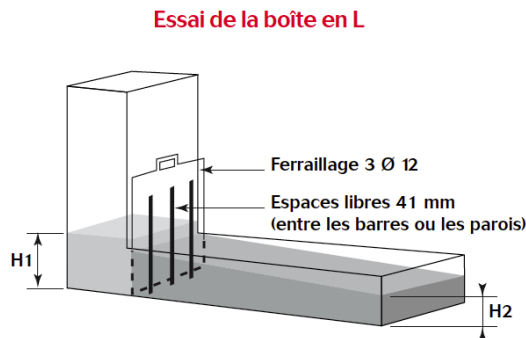


Figure 05 : - Représentation schématique de l'essai à la boîte en L [20]

1.8.1.3 Essai de stabilité au tamis : [NF EN 12350 – 11].

Cet essai vise à qualifier les bétons auto plaçant vis-à-vis du risque de ségrégation.

Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton auto nivelant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité

Cet essai consiste à l'utilisation d'un seau de 10 L avec un couvercle, un tamis de 5 mm de diamètre de 315 mm plus fond et une bascule de portée minimale de 20 kg et de précision de 20 g.

Le mode opératoire d'après les recommandations de l' [AFGC] est le suivant : A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans le seau. Après quinze minutes, un échantillon de 5 kg est versé du seau sur le tamis, deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon donne l'indice de ségrégation la mesure de cet indice conduit à classer les formules de BAP de la façon suivante: [11].

- $0 \leq \Pi \leq 15$ % STABILITE SATISFAISANTE.
- $15 \% < \Pi \leq 30$ % STABILITE CRITIQUE, L'ESSAI A REFAIRE IN SITU.
- $\Pi > 30$ % STABILITE TRES MAUVAISE, BETON INUTILISABLE.

Essai de stabilité au tamis

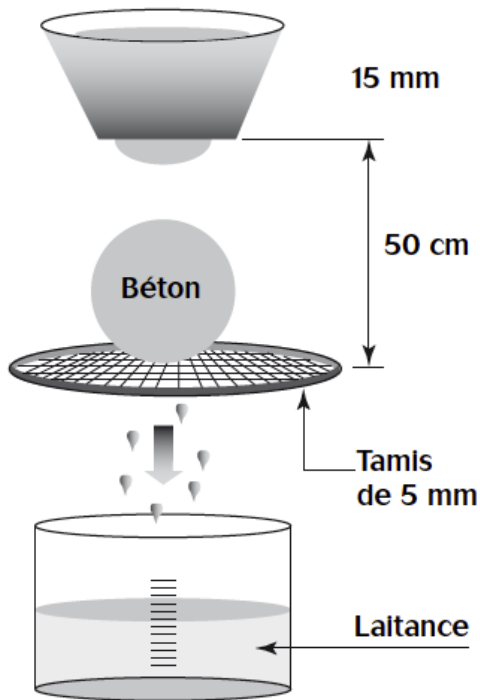


Figure 06 : Représentation de l’essai de stabilité au tamis [20]

1.8.2 Essais de Caractérisation à l’état durci

Le béton doit être soumis à différents essais mécaniques de caractérisation :

- Les essais de compression.
- Les essais de flexion.

1.8.2.1 Les essais de compression (NF EN 12390-3) : [15]

Les essais de compression sur éprouvette cubique sont des essais mécaniques normalisés couramment utilisés pour déterminer la résistance à la compression de matériaux de construction comme le béton, le mortier, ou encore certains matériaux céramiques.

1.8.2.1.1 But de l’essai :

L’objectif est de mesurer la résistance maximale à la compression d’un matériau lorsqu’il est soumis à une force axiale croissante, appliquée uniformément sur ses faces parallèles. C’est l’un des essais les plus utilisés pour qualifier le béton durci.

1.8.2.1.2 Caractéristiques de l'éprouvette

- **Forme** : Cube parfait
- **Dimensions standardisées** (en fonction du matériau et des normes) :
 - **Béton** : 100 × 100 × 100 mm (standard)
 - Autres formats possibles : 150 × 150 × 100 mm, 50 × 50 × 50 mm (pour petits échantillons ou mortier)

1.8.2.1.3 Principe de l'essai

1. L'éprouvette cubique est placée verticalement entre deux plateaux d'une presse hydraulique.
2. Une charge croissante est appliquée à vitesse constante jusqu'à rupture.
3. L'essai permet de déterminer la contrainte maximale que le cube peut supporter avant de se fissurer ou s'écraser.

1.8.2.1.4 Résistance à la compression

La résistance à la compression (R_c) est calculée à partir de la charge maximale F supportée par l'éprouvette :

$$R_c = \frac{F}{A}$$

Où :

- R_c = résistance à la compression (en MPa).
- F = charge maximale à la rupture (en N).
- A = surface de la face chargée du cube (en mm²).



Figure 07 : Mesure de la résistance à la compression des (10*10*10) cm

1.8.2.2 Les essais de flexion (NF EN 12390-5) : [16]

Les essais de flexion sur éprouvette prismatique sont couramment utilisés pour évaluer le comportement en flexion de matériaux de construction tels que le béton, les mortiers, ou les matériaux composites. Ces essais permettent de déterminer la résistance à la traction indirecte ou la résistance en flexion, notamment pour les matériaux fragiles qui ne peuvent pas être testés en traction directe facilement.

1.8.2.2.1 Caractéristiques de l'éprouvette prismatique

- **Forme** : Parallélépipède rectangle (prisme)
- **Dimensions standards (béton)** :
 - 70 × 70 × 280 mm pour le béton (NF EN 12390-5).

1.8.2.2.2 Configuration typique :

- L'éprouvette est posée horizontalement sur deux appuis.
- Une charge verticale est appliquée au centre de la travée.
- Essai conduit jusqu'à la rupture.

1.8.2.2.3 Formule de la résistance à la flexion :

$$R_f = \frac{3FL}{2bd^2}$$

Où :

- R_f : résistance à la flexion (MPa).
- F : charge maximale appliquée (N).
- L : portée entre les appuis (mm).
- b : largeur de l'éprouvette (mm).
- d : hauteur de l'éprouvette (mm).



Figure 08: Mesure de la résistance à la flexion des (7*7*28) cm

1.8.3 Formulation des bétons autoplaçant :

1.8.3.1 Formulation des BAP :

La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des BO. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut assurer, en plus de l'étalement, la capacité de remplissage et la stabilité. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation.

Depuis l'invention du BAP, aucune méthodologie pratique de formulation n'a été établie.

Les différentes propriétés recherchées rendent la formulation du BAP relativement compliquée.

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un BAP.

Plusieurs méthodes de formulation de BAP ont été développées dans le monde (méthodes japonaise, suédoise, loi LCPC, etc.) répondent aux exigences La maniabilité de ce type de béton.[1] [17]

Nous rapportons un exposé général sur les approches principales.

1.8.3.2 Méthode Française :

Méthode française (LCPC) :

Proposée par [3]:

Au LCPC, un modèle mathématique basé sur les interactions entre particules Les différents composants du mélange pour prédire la compacité du mélange granulaire Les composants suivants sont précis à moins de 1 % :

- Les distributions granulaires.
- Les proportions du mélange.
- La compacité propre.
- La densité apparente.

La proportion de liant est prédéterminée (par exemple 90% ciment, 10% ajouté) Déminer la quantité de super plastifiant à saturation. D'après l'expérience du LCPC, cette détermination des quantités pour donner une viscosité élevée au béton, la moitié de cette

quantité sera plus en relation.

La viscosité est arbitrairement fixée à $5 \cdot 10^4$ réduction de la teneur en eau le résultat et le rapport liant charge restent les mêmes, le rapport d'étape agrégat liant est optimisée.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance cible, tandis que la quantité de super plastifiant est ajustée pour obtenir les seuils d'étalement et de cisaillement souhaités, Ainsi, les propriétés souhaitées du béton auto plaçant sont atteintes [3]:

1.8.3.3 Méthode japonaise :

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi (1990), se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique.

Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

a). Dosage des gravillons : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

b). Dosage du sable : Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

c). Dosage du liant : La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques eau sur ciment (E/C) et filler sur ciment (F/C) peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

d). Dosage de l'eau et du super plastifiant : Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir. [1].

1.8.4 L'approche suédoise :

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise citée ci-dessus, le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation. Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport

G/S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées. Les dosages des fines, de l'eau et du super plastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée. Cette approche permet une meilleure optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats [1].

1.8.5 Formulation par volume de pâte minimal :

Dans cette méthode le béton est considéré comme un matériau biphasique, une phase solide constitué par les granulats et une phase liquide qui est la pâte (eau, liant, adjuvants).

Les chercheurs supposent que la pâte joue deux rôles principaux dans un BAP : D'une part, elle assure la fluidité du mélange, ce qui limite les frottements entre les granulats, d'autre part elle écarte les gravillons pour éviter le phénomène de blocage. Pour assurer ces deux rôles les chercheurs jugent qu'il doit exister un volume minimum de pâte [18].

1.8.6 Formulation par optimisation du squelette granulaire :

Sachant que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte et que l'ouvrabilité est tributaire de l'arrangement du squelette granulaire. La formulation des bétons est basée sur l'optimisation de la porosité du système, en prenant en considération tous les grains solides, du ciment aux gravillons. Si la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on optimise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple montre donc le lien entre compacité et rhéologie [18].

1.8.7 Méthode basée sur un plan d'expérience :

Le principe de cette méthode est l'utilisation d'un plan d'expérience pour connaître l'effet des paramètres de composition du béton. Khayat et al ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants :

Le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines

E/(C+A), la masse de super plastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur est varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions effectuées à 25. Au final, les modèles obtenus sont fournis avec les résultats des essais, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Même si ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC.

1.9 Conclusion :

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de se familiariser avec les bétons Auto plaçant, et l'objectif étant de les définir, ainsi que citer leurs multiples propriétés, les caractériser, et résumer les principales méthodes de leur formulation.

Le béton autoplaçant est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage).

Les propriétés caractéristiques de ce béton à l'état frais sont :

- Fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation,
- Capacité de passage dans les milieux confinés,
- Excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de ferrailage dense. Le fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé.

Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés. Ainsi, un grand nombre de tests empiriques standards sont développés pour caractériser le BAP vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité, et ses performances mécaniques.

Chapitre 02 :
Valorisation des déchets

2.1 Introduction :

La valorisation des déchets est une attitude positive plus économe, plus responsable qui œuvre dans le but de la protection de l'environnement et la santé de l'Homme. De nos jours les déchets constituent un produit qu'il faut exploiter au mieux afin d'en tirer le meilleur profit. La valorisation est non seulement utile, mais aussi souhaitable. Toute l'activité humaine consiste à créer des richesses en partant d'un produit pour en fabriquer un autre, en transformant les choses pour en créer de nouvelles. Le déchet peut être ce produit qu'il faut savoir utiliser et transformer pour en faire un matériau utile, une véritable matière première ou secondaire [21].

2.2 Les déchets :

Dans le secteur des déchets, le rôle des définitions (et du vocabulaire) est particulièrement critique. Ainsi, selon la loi 01-19 du 12 décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets le déchet est défini comme étant tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériaux, produit ou, plus généralement, tout objet, bien meuble dont le détenteur se défait, projette de se défaires, ou dont il a l'obligation de se défaires ou de l'éliminer. D'après, [22] « Les termes de "bien meuble" et "abandon" font appel à des notions de droit civil appartenant à la terminologie du droit des biens. Le terme "abandon" pourrait rattacher juridiquement le déchet "bien meuble" à la catégorie des "choses sans maîtres", choses volontairement délaissées par leur propriétaire. Cependant, la notion de détenteur et la définition de l'abandon renvoient implicitement à la responsabilité du producteur et/ou du détenteur de déchets. Aussi, derrière tout déchet surtout générateur de nuisances, se trouve une personne physique qui le produit ou le détient et qui en est responsable. [23]

2.3 Définition économique d'un déchet :

Selon le sens économique du terme, un déchet est défini comme un objet ou une matière dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur, à un moment et dans un lieu donné. Pour s'en débarrasser, le propriétaire devra payer un prestataire pour son enlèvement ou s'en charger lui-même. Cette définition de la nullité de valeur est relative car les déchets des uns sont les matières premières des autres voire même des biens pour d'autres personnes ou communautés [24].

2.3.1 Définition sociologique de "déchet" :

Socialement, les déchets s'accompagnent de jugements de valeur négatifs. Ils sont disqualifiés, comportent une connotation malsaine, suscitent souvent de la répulsion voire du dégoût et nécessitent une séparation, une ségrégation, une exclusion, un rejet. [1]

2.3.2 Définition juridique de "déchet" :

Sur le plan juridique, la question est surtout de savoir comment une chose est requalifiée comme déchet : la réponse ne concerne pas tant des caractéristiques techniques ou formelles d'une chose mais est liée à l'action de se défaire. Au niveau européen, un déchet correspond à toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou l'obligation de se défaire en vertu des dispositions nationales en vigueur. (Directive 1975/442/CEE)

2.4 Les différents types de déchets :

2.4.1 Déchets ultimes :

La loi du 13 juillet 1992 a introduit la notion de déchets ultimes et en donne la définition suivante : « un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. » A terme, seuls les déchets qui n'ont pu être ni recyclés, ni incinérés avec récupération d'énergie, pourront être mis en décharges.

Les déchets ultimes issus des usines d'incinération d'ordures ménagères et déchets assimilés, dénommés mâchefers, peuvent être transformés après traitement en granulats et utilisés pour réaliser les fondations de route [24].

Déchets ménagers et assimilés : Ce terme regroupe l'ensemble des déchets produits dans le cadre de notre vie quotidienne : emballages, restes de repas, électroménagers, vieux meubles, déchets verts, vieux vêtements, etc. [25].

2.4.2 Déchets inertes :

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, ne se décompose pas, ne brûle pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable et ne détériore pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction. Ce sont notamment les déchets suivants :

Les bétons, les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres, les enrobés bitumeux [25].



Figure 09 : Déchets inertes. [1].RP

2.4.3 Déchets dangereux :

a) Déchets industriels spéciaux (DIS) :

Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc,

b) Déchets ménagers spéciaux (DMS) :

Ce sont les déchets à risque contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage.

Il peut s'agir de ce qu'on appelle également les DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé [27].

2.4.4 Déchets non dangereux des activités économiques :

Il s'agit de déchets d'entreprises qui s'apparentent, par leur nature et leur composition, aux déchets ménagers tels que les déchets liés aux activités de commerce, les déchets de construction et les déchets des services publics (école, administration, etc.). La loi considère d'ailleurs qu'ils sont « assimilables aux déchets ménagers » et peuvent ainsi être collectés et éliminés comme des déchets ménagers [25].

2.4.5 Les déchets industriels banals (DIB) :

Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et par les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie.

Les déchets non dangereux et non inertes, dits industriels banals sont de même nature que les ordures ménagères. Ce sont :

- Les bois non traités ou traités avec des produits non dangereux (emballages, coffrages, menuiseries, planchers...),
- Les plastiques en PVC, polystyrène, polypropylène (canalisations, menuiseries, revêtements de sols, emballages...),
 - Les métaux ferreux et non ferreux tels que l'aluminium, le cuivre, l'acier, le zinc (toitures, matériels électriques, canalisations, équipements...),
- Les revêtements muraux et de sol textiles,
- Le polystyrène expansé, le polyuréthane,
- Les produits mélangés issus de chantier de réhabilitation...
- Les peintures, vernis, colles, mastics, qui ne comprennent ni solvants organiques, ni substances dangereuses. [27]

2.4.6 Les déchets médicaux et pharmaceutiques :

Tout déchet issu des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif, palliatif ou curatif dans les domaines de la médecine humaine ou vétérinaire et tous les déchets résultant des activités des hôpitaux publics, des cliniques, des établissements de la recherche scientifique, des laboratoires d'analyses opérant dans ces domaines et de tous établissements similaires. [28]

2.5 Gestion des déchets :

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement (le traitement de rebut), la réutilisation ou l'élimination des déchets, habituellement ceux produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine, l'environnement, l'esthétique ou l'agrément local. La gestion des déchets concerne tous les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. [1]



Figure 10 : Photo d'une Gestion des déchets [1]

2.6 Principes de gestion des déchets :

Il y a plusieurs principes de gestion des déchets dont l'usage varie selon les pays ou les régions. La hiérarchie des stratégies (règle des trois R) :

- Réduire.

- Réutiliser.
- Recycler. [1]

2.7 Méthodes de gestion des déchets :

La gestion des déchets consiste en la détermination du type de traitement à appliquer à telle ou telle autre catégorie des déchets. Certes pour assurer une bonne gestion des déchets, il faut mettre des moyens sur le plan financier que matériel, par conséquent, la bonne gestion limitera les dégâts sanitaires. C'est ainsi que nous allons examiner successivement les différents modes de gestion des déchets. Ces méthodes sont actuellement au nombre de quatre.

2.7.1 L'enfouissement :

L'enfouissement est une méthode d'évacuation des déchets organiques qui consiste à creuser une fosse profonde de 0,5 à 1m pour y verser des déchets, asperger de l'essence et la couvrir d'une couche de terre afin de brûler sans fumée les déchets. Ce procédé utilise comme produits désinfectants ou désodorisants le chlore, la chaux, le mazout, et l'essence. Cette méthode reste très appropriée dans des formations sanitaires limitera les dégâts sanitaires.

2.7.2 L'incinération :

C'est un procédé urbain d'élimination finale des déchets qui consiste à brûler au moyen d'un feu les déchets produits par les hôpitaux. Les procédés de l'incinération comprennent le ramassage des déchets et ordures, le triage pour dissocier les déchets combustible et non combustible. Elle peut être considérée comme un procédé par l'excellence de traitement des immondices, c'est une méthode satisfaisante qui présente cependant quelques inconvénients, parmi lesquels on peut citer :

- Elle nécessite une évacuation des cendres après son exécution,
- Elle provoque un danger de pollution de l'environnement par sa fumée,
- Elle nécessite un investissement et un coût d'exploitation élevés pour sa construction

2.7.3 La décharge contrôlée :

La décharge contrôlée est un dépotoir public prévu à l'avance pour l'évacuation des immondices ménagères. Elle a l'avantage d'offrir des éléments pour l'alimentation des jardins ou des plantations d'arbres. Cette méthode n'est pas conseillée pour le traitement des déchets hospitaliers.



Figure 11 : Photo d'une décharge contrôlée. [2] RP

2.7.4 Le compostage :

Le compostage est un procédé de décomposition des matières organiques usée de manière à le récupérer sous une autre forme permettant une utilisation ultérieure comme engrais.

Il nécessite les préparations suivantes :

Réception des ordures, triage des ordures, préparation des compostes, décomposition, présentation du produit fini



Figure 12 : Compostage de déchets organiques. [1]

2.8 Déchets utilisés comme granulats du béton :

2.8.1 Laitier d'acier :

Ce laitier est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bi calcique, il est utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes. Le laitier dans ce béton normalement, cendre volailles mais allés ne sont pas beaucoup utilisée, ce laitier est stocké en piles pendant une période allant jusqu'à un an avant d'être utilisé. L'utilisation de ces laitiers est assez peu répandue en raison des problèmes de stabilité dimensionnelle. Des procédés de vieillissement se sont développés afin de maîtriser cette instabilité et des initiatives de valorisation, notamment en génie civil. Aussi, les risques environnementaux associés à l'utilisation des laitiers dans certaines filières sont encore peu connus

2.8.2 Cendres volantes :

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granulats légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont issues de la combustion du charbon pulvérisé et poussé dans la chambre de combustion d'un four par des gaz d'échappement. Elles sont préférables à beaucoup d'autres granules légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace, du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage. Les cendres volantes sont classées selon leurs teneurs en CaO et du type du charbon brûlé

2.8.3 Déchets de verre :

Le verre est un corps solide, non cristallin, homogène, provenant du refroidissement progressif de certaines substances après fusion. Le verre est l'un des matériaux les plus utiles car il possède de nombreuses qualités. Il est facile à modeler, transparent et peut prendre de nombreuses formes.

Le problème environnemental que posent les déchets non biodégradables tels que les bouteilles non réutilisables (verre) devient une préoccupation majeure au regard des quantités énormes produites dans les grandes villes. L'une des rares voies de recyclage de ces déchets est de les stocker dans les procédés de construction (béton). Ainsi, le verre est un matériau riche en silice et en sodium. Son utilisation dans une matrice cimentaire entraîne deux

réactions à effet contraire : la réaction alcali silice néfaste pour les bétons par les gonflements qu'elle génère.

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. Il est utilisé sous deux formes principales: les granulats (taille > 4mm) et les poudres (taille < 4mm). Les granulats sont utilisés en remplacement des graves dans les bétons et lui procurent une résistance moindre.

Les poudres sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment comme fines.



Figure 13: Déchets de verre. [1]

2.8.4 Déchets de marbre :

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris pouvant présenter des veines ou des fossiles. Certains types de marbre portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides de plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangé à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2,27. La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc ils existent des variétés, beiges, bleus, roses, gris jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires.

La production de marbre en France est faible et on constate une régression par rapport à des pays comme l'Italie, le Portugal, et la Grande Bretagne. Les produits marbriers Algériens sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : italiennes et

françaises en particuliers .les procédés utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde :

- Sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et haveuse pour l'abatage et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières.
- Transformation des produits finis au moyen de lames et disques, débitages secondaires et ponçages avec des pierres ponces.

Le marbre Algérien est exploité actuellement par l'entreprise nationale du marbre "Enamarbre" qui dispose de dix unités de production implantées dans cinq Wilayas [29].

La production de marbre en blocs (2018), par les filiales de l'entreprise " Enamarbre "est de 200.000m²



Figure 14 : Déchets de marbres. [1]

2.8.5 Déchets de démolition :

Le béton constitue presque 75%, en poids de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie de rebuts de démolition est constituée de béton. Par ailleurs, les sinistres (principalement les séismes) fournissent chaque année des millions de tonnes de débris de béton.

Aujourd'hui, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux de démolition en fonction de leur nature :

- 1) les bétons armés sans enduit ni plâtre,
 - 2) les matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs rocheux, etc.
 - 3) les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique, etc.
 - 4) les mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre, plastique : supérieure à 10%,
- les autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes

2.8.6 Déchets de production de l'industrie du béton :

Les granulats de déchets de production ont deux origines :

- 1) Les débris de béton générés tout au long des étapes de la production ; ils résultent du nettoyage des installations de fabrication et du transport du béton frais (chutes de béton); il peut également s'agir de béton provenant de gâchées non utilisées ou non utilisables.
- 2) Les produits défectueux, mal formés, partiellement cassés ou d'aspect non conforme ; à ces produits défectueux s'ajoutent les produits ayant fait l'objet d'essais de résistance à la rupture.

2.8.7 Déchets plastiques :

On entend par déchet plastique, les résidus de processus de production, de transformation et de consommation, ou encore les produits plastiques destinés à l'abandon. Les déchets plastiques peuvent incorporés dans des matrices cimentaires. En effet, des études antérieures ont montrées qu'il était possible d'utiliser les déchets plastiques dans les bétons comme liant pour la production d'un matériau composite à haute performance ou sont ajoutés dans le béton (sous forme de grains et fibres ondulées et rectilignes [30]).

Il existe plusieurs types de déchets plastiques :

- Les déchets plastiques industriels
- Les déchets de production
- Les déchets de transformation

2.8.8 Ciment durci :

Dans le cas où un sac de ciment est en contact avec l'eau, la poudre se cristallise. Cette recristallisation du ciment est suivie d'une réaction d'hydrolyse. Ces deux réactions sont rapides et provoquent le durcissement du ciment. Il devient inutilisable comme liant sur le

chantier. Le ciment ainsi durci devient automatiquement un déchet. Il peut être concassé et utilisé comme granulats de béton. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence, il est donc important d'éliminer le ciment durci et d'œuvrer pour empêcher sa production.

2.8.9. Déchets de briques :

Les déchets de briques sont issus de l'industrie des produits rouges. Ces produits comptent parmi les plus anciens matériaux de construction, ils sont des produits céramiques dont les argiles sont la matière première et parfois des additifs. Les briques ont généralement une forme parallélépipède rectangle. Il existe deux types de briques: briques en terre crue et briques en terre cuite

- Briques en terre crue
- Briques en terre cuite

2.9 Le recyclage :

Recycler, c'est fabriquer un nouvel objet à partir de vieux objets, mais le nouvel objet obtenu étant différent de l'ancien qui a servi de matière première. Le déchet devient alors une ressource. Selon la directive européenne 2008/98/CE, le recyclage, contrairement à la régénération, est toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou d'autres fins. Cela inclut Chapitre3 la valorisation des déchets 15 le retraitement des matières organiques, mais n'inclut pas la valorisation énergétique, la conversion pour l'utilisation comme combustible ou pour des opérations de remblayage. Article 3, alinéa 17 de la directive 2008/98/CE du parlement européen et du conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives) Le recyclage est la réintroduction directe d'un matériau contenu dans un déchet dans le circuit économique [46] ou dans le cycle de production dont il est issu, en remplacement total ou partiel d'une matière première neuve. Il cible principalement les matériaux suivant : le papier-carton, les emballages, le verre et les métaux dans les pays industrialisés et les déchets plastiques dans les pays en développement et intervient une fois que le déchet est créé. Il ne permet donc pas de l'éviter, mais, il a le mérite d'économiser des matières premières [21] (L'Agence européenne pour l'environnement, 2003)

2.10 Recyclage du verre :

Les déchets en verre provenant des ménages se composent de bouteilles, de pots, de flacons, de bocaux, de vitrages, etc. La quasi-totalité de ce gisement est constituée de déchets d'emballages encore appelés « verres creux ». Les modalités d'élimination des déchets en verre ménagers sont déterminées dans le livre V du code de l'environnement [24].

Le consommateur est le premier maillon de la chaîne du recyclage. A ce titre, il représente un partenaire privilégié dans la recherche de la qualité indispensable pour le développement durable du recyclage du verre. Le verre est 100% recyclable et à l'infini après broyage et refonte du calcin dans un four

2.11 Le verre récupéré :

Le calcin est du verre récupéré à partir de déchets (ménagers et assimilés, etc.) ou directement à partir de chutes de fabrication. Il est d'abord trié et nettoyé pour éliminer toutes les impuretés.

Ensuite, avant d'être introduit avec les matières premières afin de former le lit de fusion, il est broyé très finement



Figure 15 : Le verre récupéré. [1]

2.12 Les verres :

Le verre est un des plus anciens matériaux de l'humanité, on peut le trouver à l'état naturel dans certaines roches d'origine volcanique ou météorique. Sa fabrication par l'homme remonte à la plus haute antiquité, la date de naissance du verre n'est pas facile à fixer avec précision, car elle varie avec le degré de sévérité adopté pour définir le verre, d'après MOREY. Les plus anciennes pâtes vitreuses étaient connues depuis environ 1200 ans avant Jésus-Christ, le verre pur date de 7000 ans avant Jésus-Christ. Les verres ont été trouvés en Egypte et ils ont été probablement ramenés d'Asie [30]

A l'occident, la fabrication du verre était dispersée sur des sites isolés après la chute de l'empire romain, mais elle était connue à Byzance et plus tard au moyen orient par les arabes. En l'année 1300, Venise devenait le lieu de la naissance de l'industrie du verre en Europe, le progrès à techniques du verre et ses applications par la suite était rapide [30]

Le début de l'industrie artisanale du verre qui correspondant à l'utilisation de soufflage se situe au début de notre 15^{ème} siècle. Au 17^{ème} siècle avec le développement des connaissances

dans le domaine de l'optique, sont apparus les premiers instruments d'observations utilisant le verre (lunette télescope ...). L'industrie verrière pour la fabrication de bouteilles et de verres à vitres a commencée aux Etats Unis au début du 18^{ème} siècle. En 1879, Monsieur Thomas Edison a inventé l'ampoule incandescente qui a changé les vies des millions de personnes tout autour du monde. C'est une application typique qui n'est possible sans l'utilisation de verre qui lui seul satisfait les propriétés nécessaires pour le fonctionnement : dureté, transparence, tenir le vide et résister aux températures élevées en même temps. Avec le progrès technologique, le champ d'application du verre n'a cessé de s'étendre surtout dans l'optique pour la fabrication des composants optiques tels que : les lentilles, les prismes, miroirs...etc. Son large spectre d'utilisation, la rendue indispensable dans des applications fines de haute précision. Pour cette raison il a été classé comme « matériau noble » par la communication scientifique [30].

2.13 Structure du verre :

Dans tout solide, il existe entre les éléments constitutants un certain arrangement qui détermine sa structure. Il en est ainsi pour le verre, les éléments constitutifs du verre de silice sont les tétraèdres SiO_4 qui sont assemblés par les sommets par des ions O^{2-} **figure 16**.

Dans le cas de la structure cristalline (quartz) l'angle Si-O-Si est constant et égale à 140° , alors qu'il peut varier dans le cas de silice vitreuse autour d'une valeur moyenne de 145° . Cela suffit pour que le réseau de silice vitreuse soit désordonné. [23].

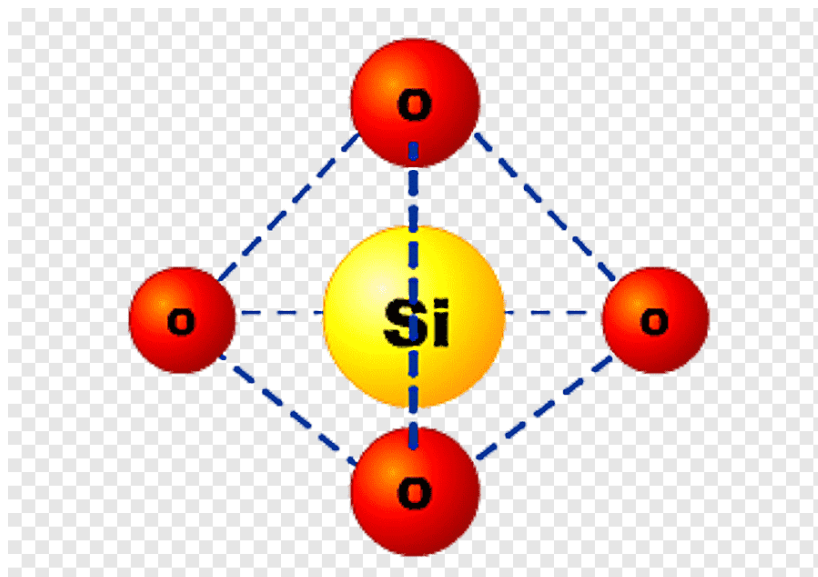


Figure 16 : Représentation schématique de la structure du verre de silice. [23].

2.14 Le verre en génie civil :

Le verre est employé couramment dans beaucoup de secteurs par les produits manufacturés tels que le verre à vitres, les bouteilles, la verrerie, et la tuyauterie de vide. Toutes expériences et essais avec le verre ont prouvé que c'est un matériel idéal pour la réutilisation ce qui va aider à économiser l'énergie. Une de ses contributions significatives est au champ de construction et génie civil où le verre a été réutilisé pour la production du béton. [23].

2.15 Avantages économique et techniques « du béton de verre » :

Beaucoup de recherches et d'études ont prouvé que le verre peut efficacement être employé comme un remplacement de granulats fins sans changement substantiel de force ce qui nous donne une bonne option en cours d'avoir le béton vert. L'incorporation du verre dans le secteur de construction est très avantageuse et utile. [23].

2.15.1 L'avantage technique :

➤ Ce type de béton léger fournit de faible densité ce qui réduit les charges à constructions, en plus la bonne conductivité thermique est l'une des caractéristiques qui aide à avoir des éléments d'enveloppe de bâtiment et d'isolation thermique efficace et durable.

➤ Le béton léger fait à partir des granulats de verre faits en incorporant ces granulats dans la matrice cimentaire possède un niveau d'absorption d'eau fondamentalement nulle. Ce type de béton est considéré l'un des matériaux les plus durables et avec l'emphase courante sur la longévité du béton à rendement élevé, il est seulement normal de compter sur ces ingrédients extrêmement durables.

- Bon remplissage des coffrages et enrobage des armatures adéquat sans vibration.
- Facilité de coulage dans des endroits confinés et/ou difficiles d'accès.
- Possibilité de confectionner des structures de géométrie complexe et/ou fortement ferrillées.
- Meilleures performances et durabilité grâce à leur grande compacité.
- Propriétés mécaniques analogues ou supérieures à celles du béton vibré.
- Amélioration des qualités esthétiques des parements et des surfaces.
- Mise en place aisée par pompage.

- Pour un certain nombre de raisons, les granulats en verre améliorent les propriétés d'écoulement du béton frais de sorte que des résistances très hautes puissent être obtenues même sans utilisation des super plastifiants.
- L'excellente dureté du verre donne le béton une résistance d'abrasion qui peut être atteint seulement avec peu d'agrégats en pierre normaux ou avec l'addition des fines métalliques. [23].

2.15.2 Avantages économiques :

- L'application de ce type de béton dans la construction réduit les coûts du bâtiment, décharge la construction et contribue de façon considérable dans le processus d'incorporer des matériaux de construction verts dans des projets de génie civil.
- La quantité de verre de rebut a graduellement augmentée au cours des années dues à une utilisation toujours croissante des produits de verre. La plupart des verres de rebut ont été vidées à emplacements de remblayage qui sont indésirables parce qu'ils ne sont pas biodégradables. En raison de ceci il y a potentiel énorme pour l'usage du verre de rebut dans le secteur de construction.
- Le potentiel esthétique du verre a offre de nombreuses nouvelles applications avec une grande amélioration au niveau du parement.
- L'utilisation du verre en béton ouvre un vaste marché afin de produire une variété de produits de spécialité ou dans des opérations de construction et bétonnage locales. [23].

2.16 La valorisation :

2.16.1 Définition de la valorisation :

Valoriser, c'est donner de la valeur à quelque chose. D'après Mayster (1994), valoriser un déchet recoupe toute action qui permet d'en tirer de l'énergie, de trouver un nouvel usage à la matière qui le compose, de tirer une matière première secondaire utile à la fabrication du même bien et de trouver un nouvel usage ou qui permet à un déchet de redevenir utile pour d'autres. D'après la directive européenne 75/442/CEE du conseil du 15 juillet 1997 la caractéristique essentielle de l'opération de valorisation consiste à faire remplir aux déchets une fonction utile. Ils se substituent pour cela à l'usage d'autres matériaux qui auraient dû être utilisés pour remplir cette fonction, afin de préserver les ressources naturelles. La valorisation

se décline en : valorisation de la matière qui permet de réutiliser les éléments constitutifs du déchet en les intégrant dans le circuit économique ; valorisation biologique permettant la production d'engrais et de compost et valorisation énergétique (production de chaleur et d'électricité[1]).

2.16.2 La valorisation de la matière :

On distingue différentes formes de valorisation des matières liées aux conditions économiques, sociales et culturelles. Ces formes sont : le réemploi comme la réutilisation des bouteilles en verre, des emballages, etc. ; le recyclage qui permet d'obtenir de nouveaux produits en intégrant ces matières premières et secondaires dans un nouveau cycle de production (Aloueimine, 2006). La valorisation de la matière englobe donc : le recyclage et la récupération des déchets. Une grande partie du secteur informel est basée sur cette activité avec la récupération de carcasse de véhicules, de plastiques et de métal. [1].

2.17 Conclusion :

La valorisation des déchets est une étape cruciale dans la gestion responsable des déchets, offrant de multiples avantages environnementaux, économiques et sociaux. En conclusion, il est clair que la valorisation des déchets est une stratégie durable et nécessaire pour réduire notre empreinte écologique, préserver les ressources naturelles et promouvoir un mode de vie plus respectueux de l'environnement. Cependant, pour maximiser son efficacité, il est essentiel d'adopter une approche holistique, impliquant la sensibilisation du public, des investissements dans la recherche et le développement de nouvelles technologies, ainsi qu'une collaboration étroite entre les gouvernements, les entreprises et la société civile. En investissant dans la valorisation des déchets, nous investissons dans un avenir plus propre et plus durable pour les générations à venir.

Chapitre 03 :
Béton autoplaçant exposé à la
haute température.

3.1 Introduction :

Le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans les ouvrages de génie civil. Sa composition et ses propriétés ont connu une évolution significative afin de répondre aux exigences modernes du secteur. Parmi les innovations marquantes figure le béton autoplaçant (BAP), un type de béton fluide capable de s'écouler, de remplir les moules et d'enrober les armatures sans vibration mécanique, ce qui facilite la mise en œuvre et améliore la qualité du coulage.

Cependant, le comportement du béton autoplaçant lorsqu'il est exposé à des températures élevées soulève des questions importantes en matière de sécurité et de durabilité des structures, notamment en cas d'incendie ou dans des environnements industriels chauds. En effet, les hautes températures peuvent affecter de manière significative les propriétés physiques et mécaniques du béton, telles que la résistance mécanique, la porosité ou encore la cohésion interne.

les dégâts apparents sur un élément en béton peuvent se présenter sous forme d'un écaillage superficiel, d'une décohésion généralisée du béton (la ruine totale de l'ouvrage), ou bien d'une chute de caractéristiques mécaniques des armatures de surface (perte d'adhérence, éclatement de l'enrobage).

Dans cet exposé, nous allons examiner l'impact des hautes températures du béton autoplaçant et sur son comportement, en mettant en évidence les modifications structurelles qui peuvent survenir, la comparaison avec le béton traditionnel, ainsi que les différentes approches visant à améliorer sa résistance thermique.



Figure 17 : Incendie du Tunnel du Mont Blanc, en France, durée de 53heures (24 au 26 Mars ; 1999). [3].

3.2 Comportement au feu des structures en béton lors d'incendie

Les qualités de résistance mécanique, de facilité d'utilisation, de durabilité et la très bonne tenue au feu, font du béton le matériau de construction par excellence. Mais lorsqu'il est exposé au feu, le béton perd graduellement sa résistance mécanique et il se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur. Cependant, ce processus de dégradation est suffisamment lent et progressif pour permettre un maintien de la stabilité des structures pendant un laps de temps, le plus souvent, suffisant à l'évacuation des personnes, mais aussi, pour permettre de retrouver après extinction de l'incendie un ouvrage endommagé mais réparable [34] [37].

Les dégradations de béton par incendie sont relativement rares pour les ouvrages d'art et affectent d'avantage les bâtiments. A titre d'exemple, l'incendie du gratte-ciel Windsor de 29 étages à Madrid, la tour est resté debout malgré le feu qui s'est propagé à de nombreux étages. Le feu à démarré au 21ième étage et s'est rapidement propagé, il s'est achevée après 26 heures de lutte laissant un bâtiment complètement brûlé [35][37].

Néanmoins, il existe quelques cas d'incendie sous des ponts en béton qui ont provoqué un endommagement significatif du matériau. Le viaduc des trois Fontaines, construit en 1981 à Bruxelles, a subi l'agression d'un large feu localisé durant la nuit du 6 au 7 décembre 2003. Une température de 750°C été atteinte à la surface des poutres et le tablier. Les poutres présentent à plusieurs endroits des éclatements de béton au droit des semelles et des âmes. A certains endroits, des armatures et des torons précontraints sont visibles. En face inférieure de la dalle, des éclatements de béton (détachement de morceaux) sont aussi visibles [35] [37].

Dans le cas des tunnels routiers, les températures qui s'installent lors des incendies peuvent être supérieures à 1000°C [35] [37]. On peut citer l'incendie important du tunnel sous la Manche, le 18 Novembre 1996. Cet ouvrage a été soumis à un feu d'une durée de près de 9 heures et une température maximale de près de 1100°C.

Après l'incendie du tunnel du Mont-Blanc (24 mars 1999), une investigation in situ, qui a été complétée par une étude en laboratoire, a été menée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC [36] [37].

Cette investigation a pour objectif d'évaluer les caractéristiques mécaniques résiduelles du béton ainsi que de connaître la profondeur de l'endommagement dans le but d'optimiser les travaux de réparations.

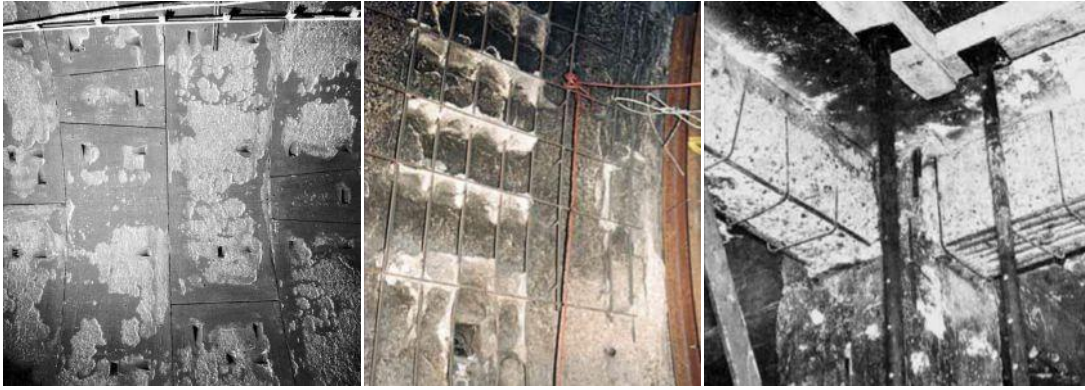


Figure 18 : À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l’incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l’incendie [35] [37].

Les différents faciès de dégradation du béton sont regroupés dans le **Tableau 02**.

Tableau 02 : Classification des dégradations d’ouvrage en béton par incendie[36] [37].

Classe de désordres	0	1	2	3	4
Vue en élévation d’une poutre sous dalle					
Coupe					
Désordres observés	Aucun. état de référence de béton sain.	Dépôts de suies, coloration, traces de microfissures non orientées (faïençage).	Ecaillage superficiel (0 à 10 mm), Fissures nettes et orientées (>0,5 mm).	Disparition du béton d’enrobage, Les armatures sont visibles, Le béton sous-jacent est légèrement feuilleté.	Les armatures sont totalement dégagées et présentent des déformations plastiques, Une forte épaisseur de béton a disparu ou est feuilletée et a perdu sa cohésion.



a- classe 2

b- classe 3

c- classe 4

Figure 19 : Exemples de désordres de différentes classes, a/ écaillage superficiel, b/disparition du béton d'enrobage des armatures, c/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de l'épaisseur de béton atteint 50% [36] [37].

3.3 Evolution des propriétés physique du béton à haute température :

3.3.1 : Les modifications physico-chimiques dans le béton à haute température :

Les principales réactions physico-chimiques dans le béton au cours de son échauffement sont regroupées dans le (Tableau 03). [38]

Tableau 03: les principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température. [38]

Entre 30 et 105 °C	L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. Elle est complètement éliminée à 105°C.
Entre 130 et 170 °C	Une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Autour de 180 °C et jusqu'à environ 300 °C	On a la première étape de la déshydratation. La chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton.
A environ 250 et 370 °C	On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques).
Entre 450 et 550°C :	Il y a décomposition de la portlandite en chaux libre : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
Autour de 570 °C:	Il y a transformation de structures du quartz α en quartz β , accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques et basaltiques.
Entre 600 et 700 °C :	Il y a décomposition des phases de C-S-H et formation de β -C2S. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bi- calciques.
Entre 700 et 900 °C :	Il y a décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique
A dessus de 1300-1400 °C :	Début de la fusion des agrégats et de la pâte de ciment.

3.3.2 Dégradation de l'interface pâte-granulats :

A hautes températures, les granulats se décomposent et subissent des modifications physico-chimiques et minéralogiques significatives qui modifient les caractéristiques microstructurales du matériau. , les granulats en contact de la pâte de ciment peuvent être réactifs ou neutres. Les granulats siliceux par exemple sont considérés neutres. Ils ne réagissent pas avec la pâte de ciment et n'ont pas de liaison importante avec la matrice cimentaire. Les granulats calcaires au contraire présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment et sont considérés comme réactifs [24]. Les granulats de quartzite (siliceux) présentent des caractéristiques relativement stables vis-à-vis du feu. À partir de 573°C une transformation du quartz α en quartz β s'accompagne d'une forte dilatation de 1 % à 5 %. Cette variation de structure cristalline dans les granulats peut provoquer une instabilité thermique lors du chauffage. Les granulats calcaires présentent un comportement thermique stable jusqu'à une température de 600°C. Au-delà de cette température, la décarbonatation de la calcite a lieu : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Lors du refroidissement, le CaO peut réagir avec l'humidité de l'air pour donner de la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La formation de cette nouvelle Portlandite avec un volume supérieur à celui du granulat initial, crée des nouvelles fissurations dans le béton. [38]

3.3.3 Evolution de la porosité :

Le béton est un matériau poreux bi phasique, composé d'une phase solide et d'une phase poreuse. La porosité totale peut être mesurée par saturation d'eau et la porosité capillaire se mesure généralement par porosimétrie au mercure. [38]

Différentes études ont été réalisées sur la variation de la porosité de béton en fonction de la température. Les travaux sur les bétons ordinaires, les bétons à hautes performances, les bétons auto-plaçants ont montré une augmentation progressive de la porosité de ces bétons en cours de l'élévation de la température. Cette augmentation est due en partie à l'augmentation du volume total de la dimension des pores ainsi qu'à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats. La (Figure 20) montre la

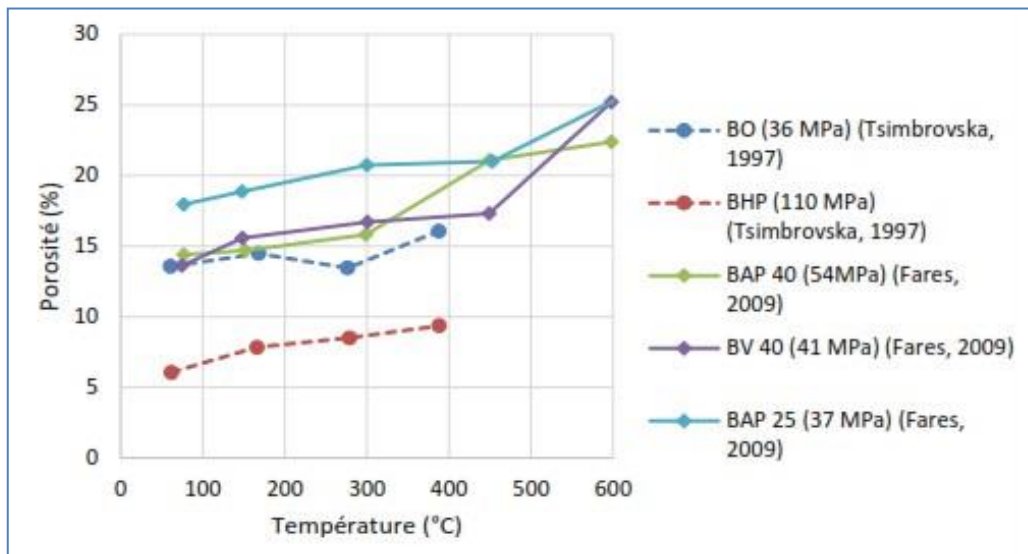


Figure 20 : Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température [38]

3.3.4 Evolution de la masse volumique :

A haute température, ce paramètre dépend fortement de la nature des granulats dans le béton. La (Figure 21) montre les variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. On observe une diminution quasi-linéaire jusqu'à 800°C, or le béton à granulats calcaires présente une forte diminution de la densité au-delà de 800°C. Cette baisse de la masse volumique est liée à deux phénomènes à savoir l'hydratation complémentaire des anhydres et la carbonatation de la portlandite. [38]

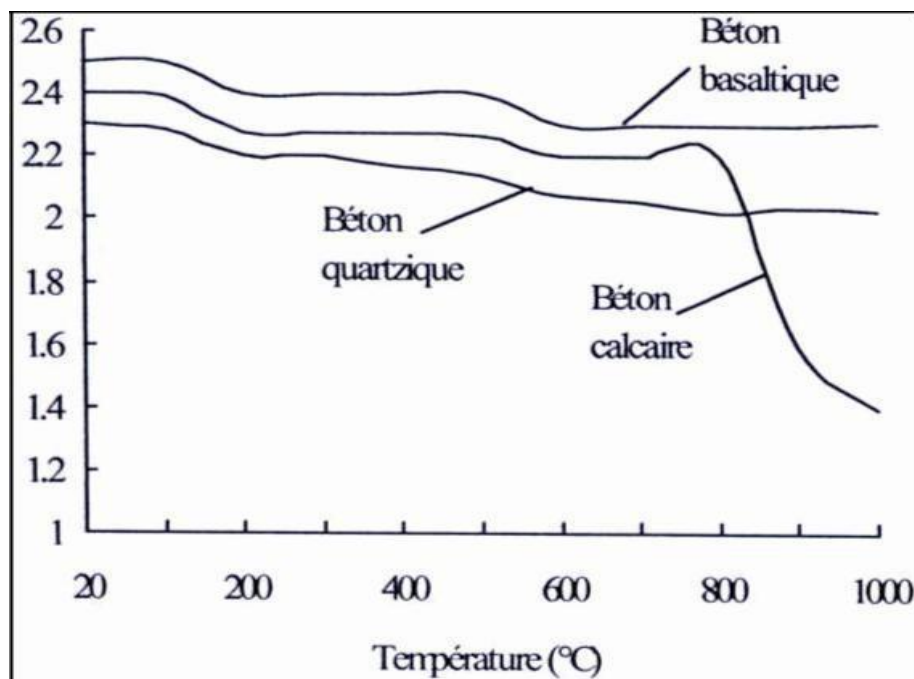


Figure 21 : Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température [38].

3.3.5 Evolution de la perméabilité :

La perméabilité d'un milieu poreux caractérise la capacité que possède ce milieu à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression. Bien que cette perméabilité dépende fortement de la porosité du milieu poreux et d'autres paramètres, tel que la connectivité, la tortuosité ainsi que la constructiviste du réseau poreux liée à la taille des pores. La perméabilité du béton dépend également de ses constituants.

Elle est fonction du rapport E/C, qui est directement liée à la porosité capillaire, de la nature et de la quantité des granulats, qui peuvent modifier la tortuosité par la création de l'auréole de transition.

La perméabilité du béton subit un accroissement significatif quand la température dépasse 100°C (Figure 22). [38]

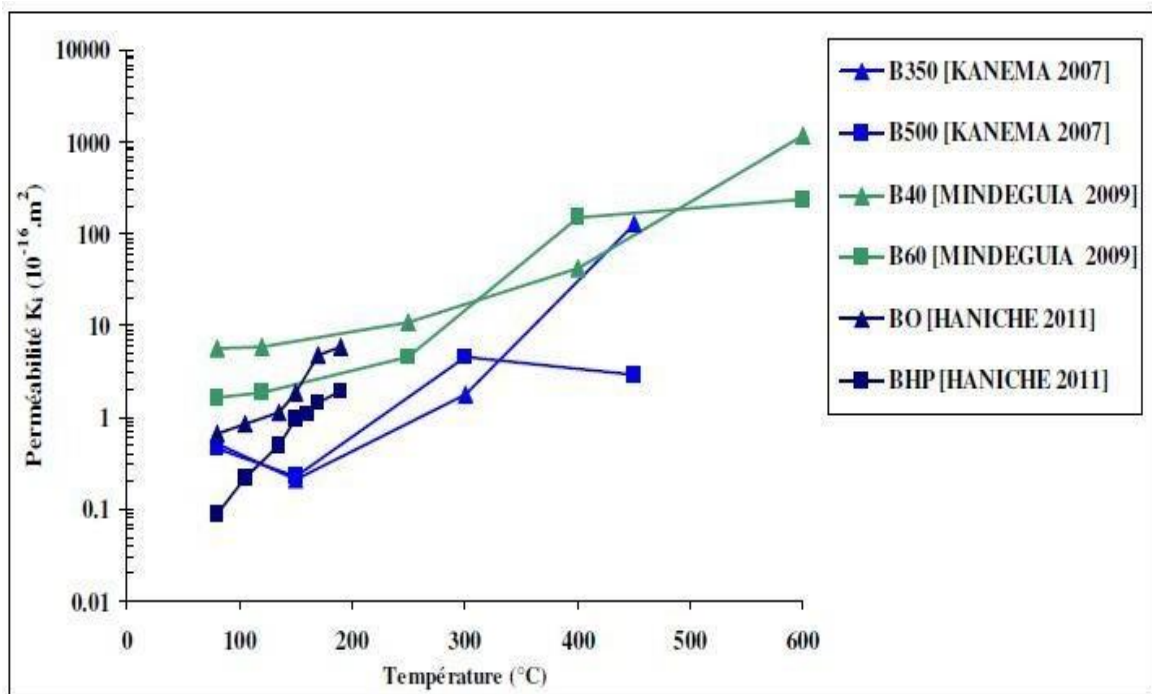


Figure 22 : Évolution de la perméabilité des bétons BO et BHP en fonction de la Température [38].

3.3.6 Perte de masse :

Lors du chauffage, le béton perd de la masse essentiellement à cause du départ de l'eau libre et liée contenue dans les pores et les hydrates et à la décarbonatation. La (Figure 23) présente l'évolution de la perte de masse de différentes compositions de béton avec et sans fibres de polypropylène au cours du chauffage [39]. Il est important de noter que les limites de température varient suivant les auteurs.

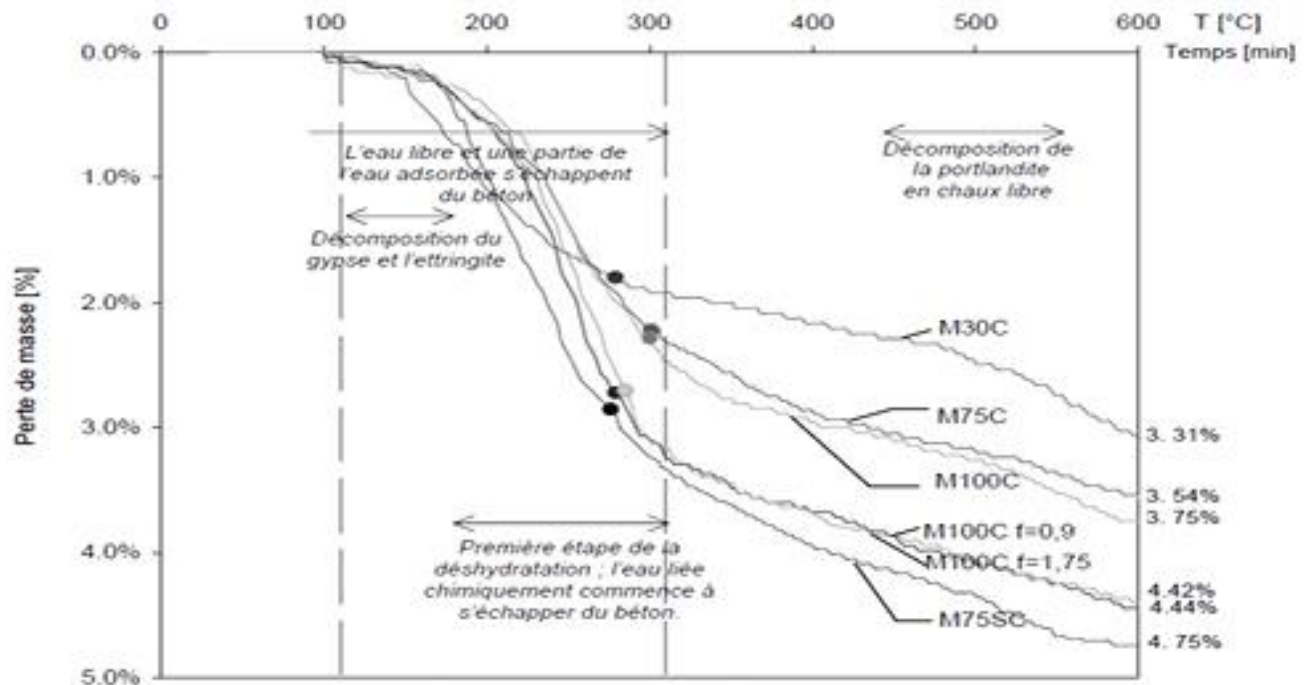


Figure 23: Pertes de masse des bétons déterminées durant le chauffage de 20°C à 600°C à la vitesse de 1°C/min. Les points indiquent la valeur de la teneur en eau obtenue par séchage à 105°C [39].

$$\text{Calcul perte de masse (\%)} = \frac{M(\text{initial}) - M(\text{chauffe})}{M(\text{initial})} \times 100$$

- **M(initial)** : masse du béton avant chauffage (à température ambiante),
- **M(chauffe')** : masse après exposition à haute température.

3.4 Evolution des propriétés mécaniques avec la température :

La sollicitation thermique sur le béton provoque une diminution graduelle des propriétés mécaniques, qu'elles soient mesurées à chaud ou à froid. Les pertes de résistance varient en fonction de la température, de la vitesse de montée en température et du type de béton.

Les principales caractéristiques mécaniques présentées sont la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité [38].

3.4.1 : Résistance en compression:

La (figure 24) montre l'évolution des résistances résiduelles en compression de bétons autoplaçants, de bétons ordinaire et à hautes performances. D'une manière générale, les résultats de la littérature montrent que la résistance à la compression du béton (à chaud ou après refroidissement) baisse avec l'élévation de la température.

L'analyse de la courbe d'évolution permet de grouper le comportement de résistance en deux domaines.

-Le premier domaine, de la température ambiante à 300°C - 400°C, est caractérisé par une légère baisse, un maintien ou une augmentation de résistance. La baisse de résistance est observée autour de 100°C – 150°C suivants les auteurs. Cette légère baisse de résistance est liée au départ de l'eau qui, lors de la montée en température, se dilate et entraîne un écartement des feuillets du gel. Cet écartement occasionne ainsi une baisse des forces de cohésion. Jusqu'à la température de 300°C - 400°C, un gain de résistance est remarqué et peut-être retardé avec les BHP compte tenu de leur faible perméabilité qui ralentit le départ de l'eau. Le départ de l'eau peut entraîner une augmentation des forces de liaison entre les hydrates avec un accroissement des énergies de surface.

-Le second domaine, au-delà de la température 400°C – 800°C, est caractérisé par une baisse continue de la résistance à la compression liée aux différentes transformations physico-chimiques. [38].

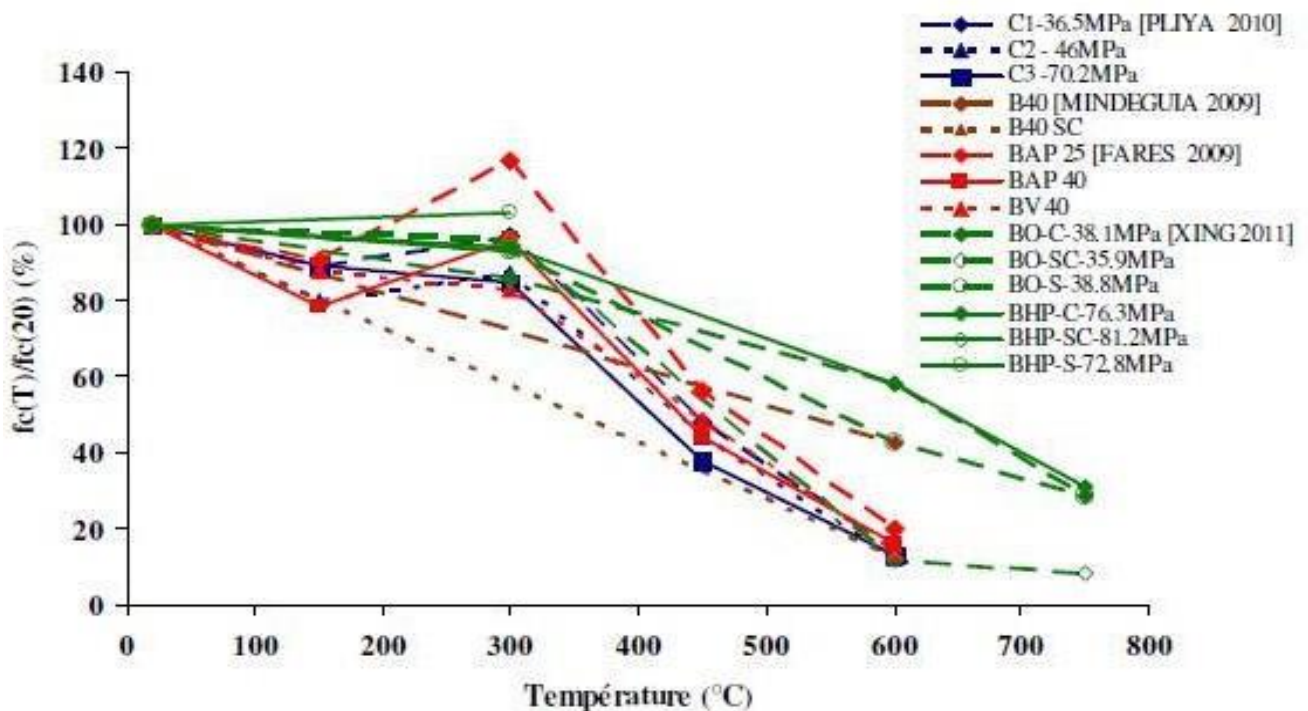


Figure 24 : Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP [38].

3.4.2 Résistance en traction :

L'évolution de la résistance en traction en fonction de la température n'a pas été étudiée aussi souvent que celle de la résistance en compression. En effet la réalisation de l'essai de traction directe ou de flexion s'avère toujours difficile, compte tenu de la localisation de l'endommagement et du développement d'une microfissure généralement instable, qui mène par la suite à la rupture brutale du matériau. Les travaux réalisés à haute température montrent une chute de cette résistance avec la température. La (Figure 25) regroupe les résistances résiduelles déterminées en flexion et en traction directe. Les mesures sont effectuées sur des éprouvettes ayant préalablement été refroidies. On remarque sur cette figure que toutes les valeurs déterminées se situent au-dessus de celles de DTU.

Dès 150°C, la résistance en traction directe baisse de 15 à 20% alors qu'elle ne diminue que 8 à 9% pour la compression. Après exposition à 500°C, les bétons gardent 60 à 63 % de leur résistance en compression alors qu'ils n'ont plus que 42 à 53 % de leur résistance en traction. [38].

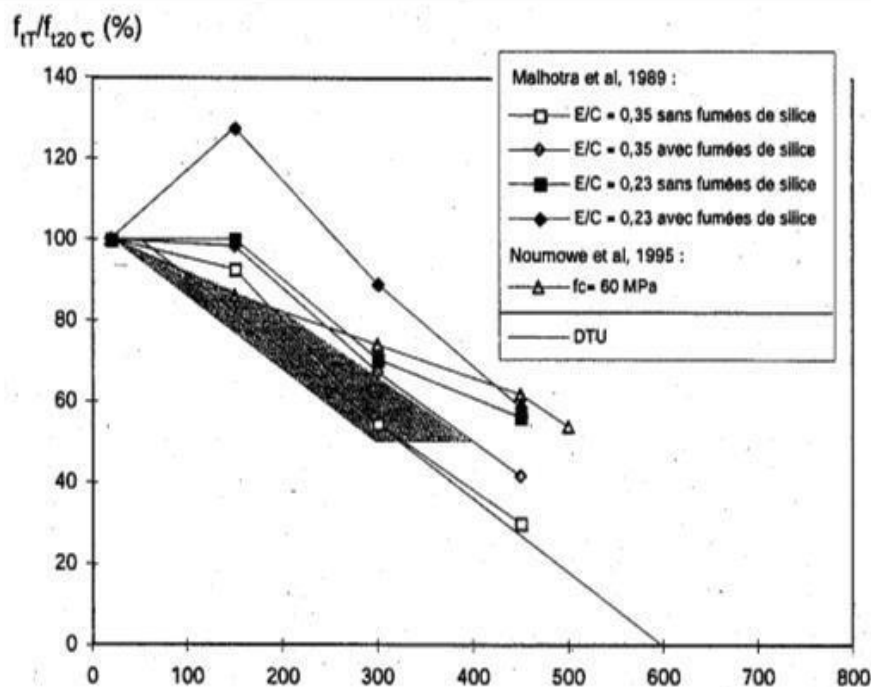


Figure 25 : Evolution de la résistance à la traction en fonction de la température [38].

3.4.3 Module d'élasticité :

Le comportement des structures dépend souvent du module d'élasticité du béton qui exprime la rigidité du matériau. Il lie la contrainte normale à la déformation instantanée longitudinale lorsque le béton est soumis à des sollicitations uni axiales. Les différents résultats

expérimentaux montrent que le module d'élasticité du béton est fortement affecté par la température. Les variations du module d'élasticité avec la température dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment d'une part et des paramètres expérimentaux d'autre part (la vitesse de chauffage, la teneur en eau, la nature des granulats ...).[38].

La (Figure 26) montre les évolutions des modules élastiques à chaud et après refroidissement. Dans la série I, les éprouvettes sont chauffées sans chargement à 1°C/min à la température désirée puis maintenue à cette température avant d'être chargées.

Dans la série II, les éprouvettes sont chauffées jusqu'à la température désirée, puis elles sont refroidies avec une vitesse de 0,5°C/min avant d'être chargées. Ces essais montrent que la rigidité du matériau baisse généralement en fonction de la température jusqu'à 120°C. Entre 200°C et 300 °C, les résultats de la (Figure 26) montrent que le module est à peu près constant.

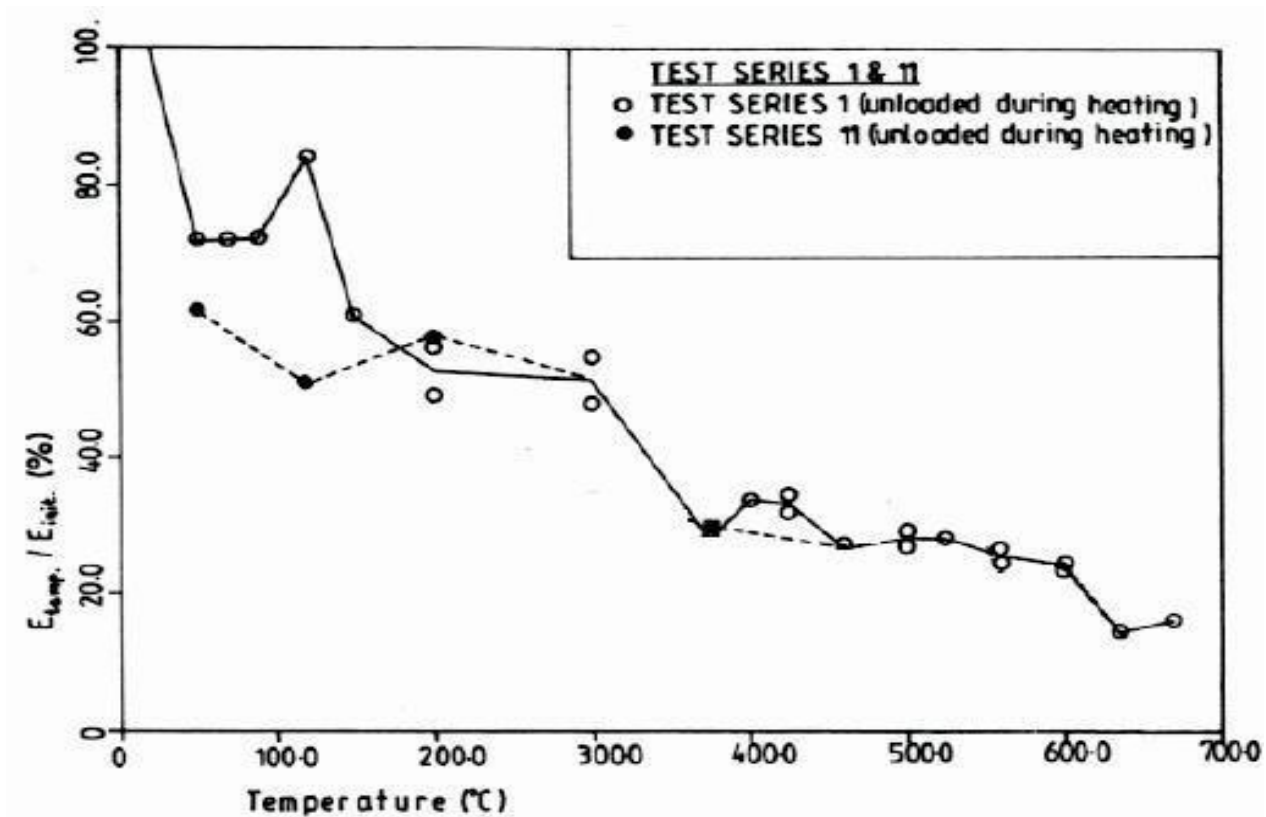


Figure 26: Evolution de la résistance à la traction en fonction de la température [38].

3.5 Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température :

L'évolution de la distribution de température dans une structure est gouvernée en grande partie par les propriétés thermiques du matériau, particulièrement la capacité calorifique et la conductivité thermique. Cependant, la détermination de ces propriétés avec exactitude, dans le cas du béton, est très difficile, en raison de nombreux phénomènes qui se produisent au

sein de la microstructure du béton. [37]

3.5.1 La conductivité thermique :

La conductivité thermique désigne l'aptitude que possède un matériau à conduire de la chaleur. Ce paramètre est prépondérant pour décrire la distribution de la température au sein du matériau lors du chauffage. La conductivité thermique du béton diminue, d'une manière générale, lorsque la température augmente. Ce comportement met en évidence la détérioration de la microstructure, les microfissures limitent les transferts de la chaleur.

Les principaux paramètres influençant l'évolution de la conductivité thermique sont: la teneur en eau, le type de granulats, le degré de saturation en eau liquide, la structure de l'espace poreux et la formulation du béton. [37]

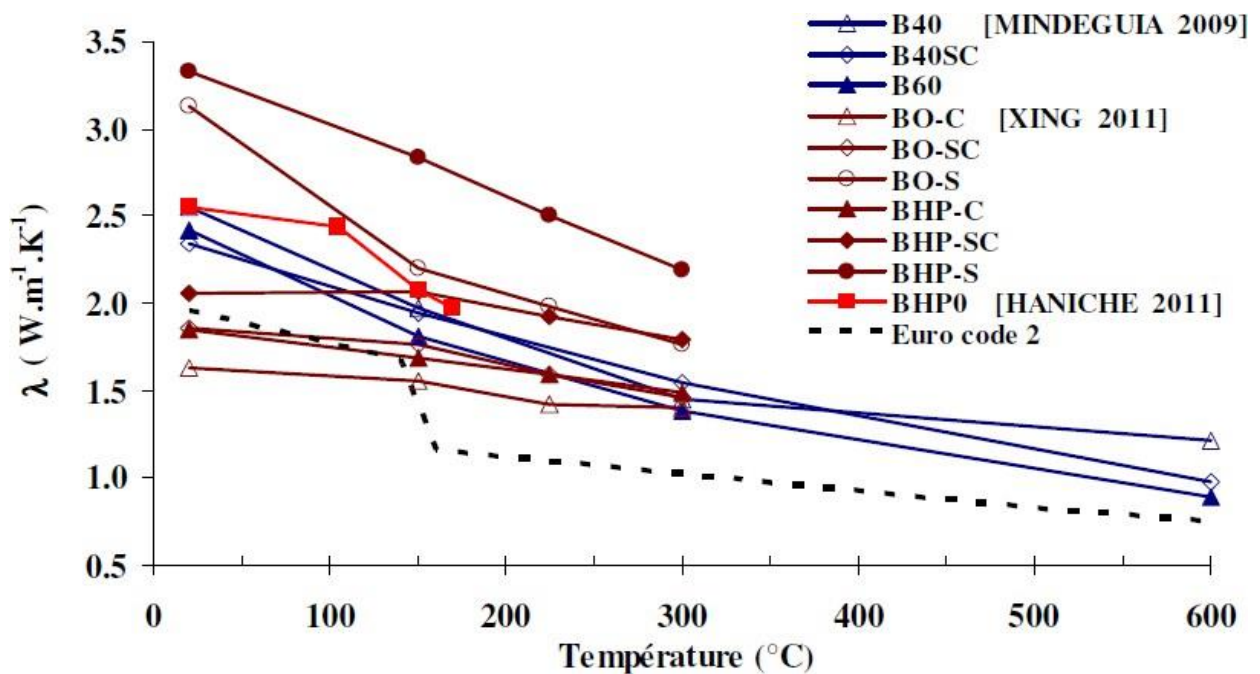


Figure 27 : Conductivité thermique du béton en fonction de la température [40]

3.5.2 Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique d'un matériau est la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C la température d'une masse unitaire de matière. Autrement dit, c'est la capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur.

L'évolution de la chaleur spécifique du béton est principalement liée à celle de la pâte de ciment et de type de granulats. [41]

La chaleur spécifique augmente d'une manière générale avec la montée de la température. Cette variation est liée aux différentes réactions endothermiques. En effet, la chaleur massique du béton à haute température est gouvernée significativement par la nature du granulat existant dans la composition du béton. Une augmentation de la chaleur massique du béton contenant les granulats siliceux se produit autour de 500°C liée à la transformation du quartzite.

L'influence des granulats calcaires sur la chaleur massique du béton est négligeable pour une température inférieure à 600°C - 800°C . Cependant, au delà de cette température, la chaleur massique du béton calcaire s'accroît immédiatement et est liée à la consommation de chaleur sous forme latente pour la décarbonatation du calcaire. La chaleur latente nécessaire pour élever la même

température du béton de granulat calcaire est dix fois plus élevée que celle du béton de granulat siliceux lorsque la température est supérieure à 600°C. [40]

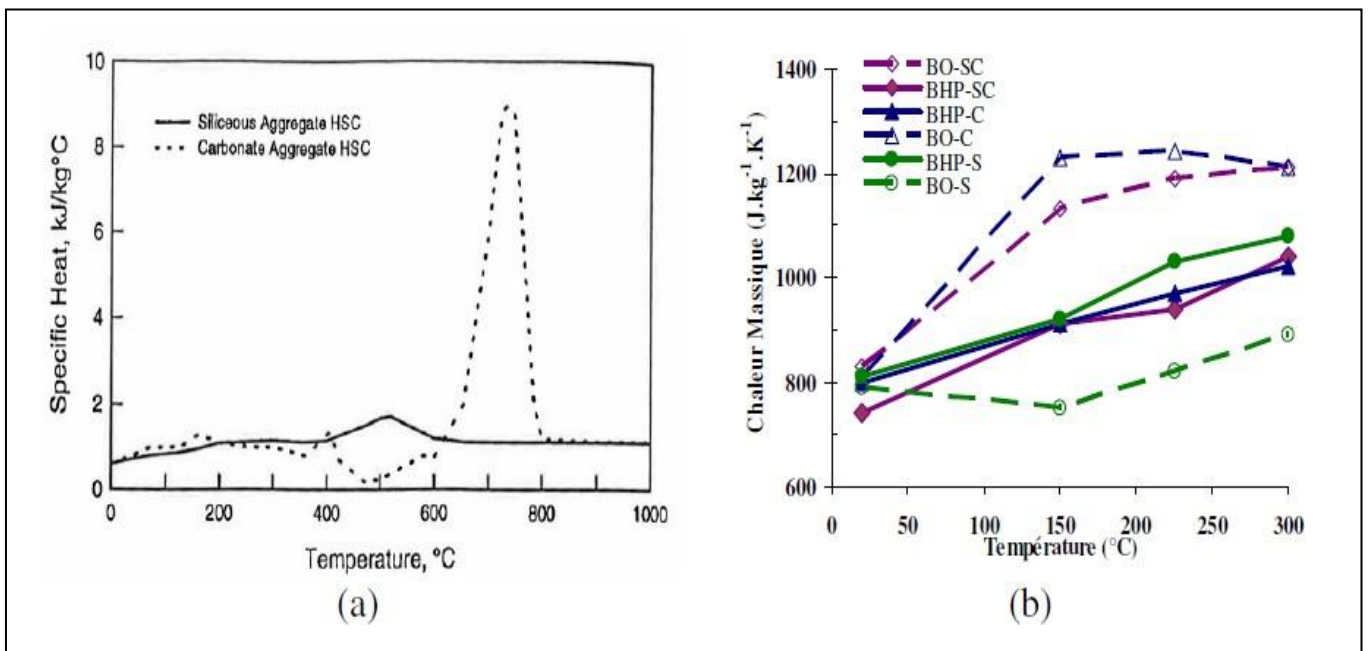


Figure 28: Influence des types de granulat sur la chaleur massique de bétons [40]

3.5.3 Diffusivité thermique :

La diffusivité thermique décrit la vitesse à laquelle la chaleur se propage à l'intérieur d'une masse de béton. Elle est directement proportionnelle à la conductivité thermique et inversement proportionnelle à la masse volumique et la chaleur spécifique. La diffusivité thermique dépend fortement de la teneur en eau, du degré d'hydratation du ciment et de la nature de granulats.

La figure 29 présente les variations de cette propriété avec la température obtenue par différents auteurs sur des bétons formulés avec différents types de granulats. Il apparaît que la diffusivité thermique du béton diminue avec l'élévation de la température.

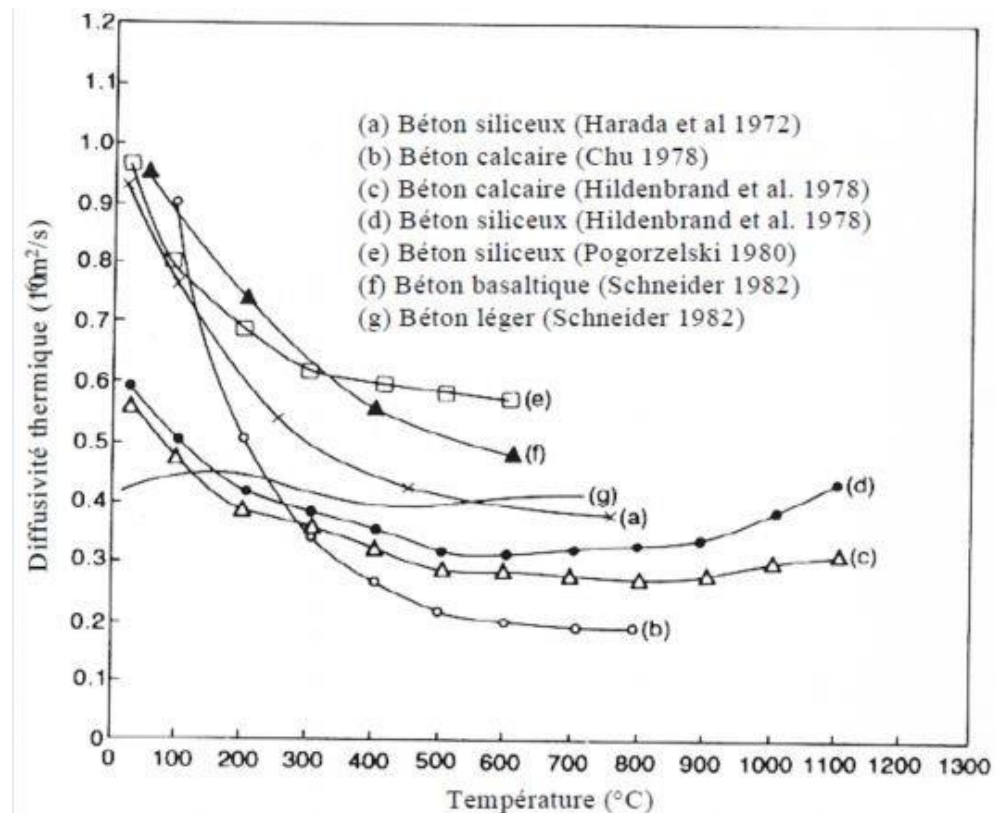


Figure 29 : Variation de la diffusivité thermique de différents types de béton avec la température [42].

3.6 Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé

Le phénomène de l'éclatement peut être principalement attribué à deux processus : le processus thermomécanique et le processus thermo-hydrique.

– **Le processus thermomécanique** : il est lié à la température au sein du béton.

Le gradient thermique crée une dilatation thermique, et lorsqu'elle est empêchée, elle génère des contraintes de compression parallèles à la face chauffée. De plus, au cours du chauffage, les granulats se dilatent, tandis que la pâte de ciment se rétracte en raison de sa déshydratation.

La pâte de ciment est ainsi soumise à des contraintes de traction et les granulats, à des contraintes de compression.

Lorsque les contraintes thermiques sont importantes, le phénomène d'écaillage peut se produire.

– **Le processus thermo-hydrique** : il est associé au transfert de masse qui engendre de fortes pressions de vapeur dans le réseau poreux. La figure 30 montre le mécanisme d'éclatement lié à la pression de vapeur. Lorsque le béton est exposé à une haute température, l'eau qui se trouve dans les pores sous forme libre ou liée commence à s'évaporer. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie migre vers les zones froides à l'intérieur puis se condense. Une accumulation de l'eau liquide dans les pores aux zones froides crée un bouchon saturé qui gêne la migration de l'eau vaporisée. Le bouchon saturé provoque une élévation de la pression interne des pores du côté le plus chaud. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du phénomène d'instabilité thermique. Dans le cas de béton de forte densité et de faible perméabilité, l'augmentation de pression pourrait engendrer l'éclatement.[40] [43]

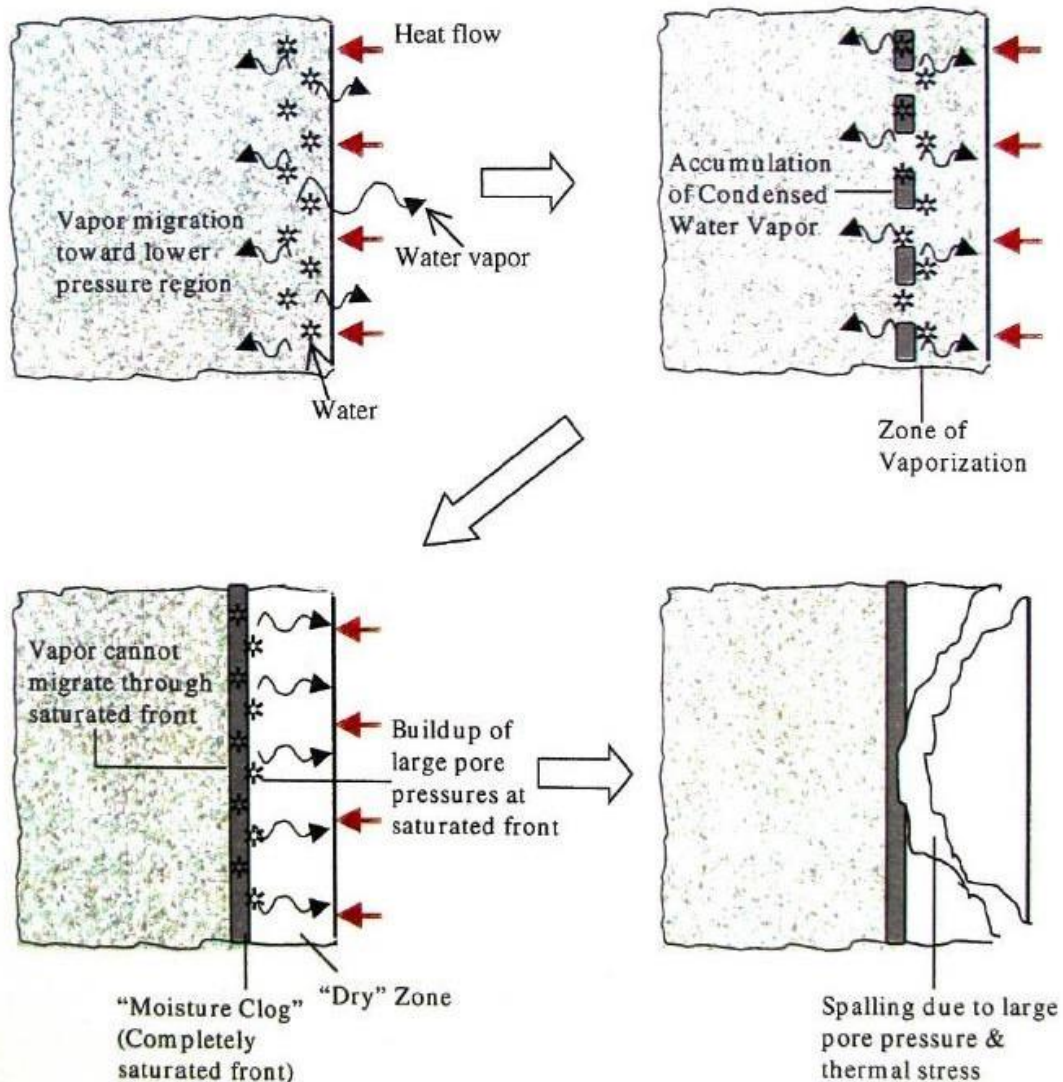


Figure 30 : Illustration du mécanisme d'éclatement. [40] [43]

3.7 Paramètres favorisant l'instabilité thermique :

Plusieurs paramètres peuvent influencer l'éclatement du béton. Une des causes principales de l'instabilité thermique du béton est la pression de vapeur dans les pores. [40]

- Teneur en eau
- Vitesse de chauffage
- Taille des éprouvettes
- Nature des granulats

3.8 Déformation thermique du béton à hautes températures :

Lorsqu'il est exposé à des températures élevées, le béton subit des modifications microstructurales entraînant la perte d'eau liée et la décomposition des composés cimentaires. Ces changements provoquent une diminution progressive de la résistance du béton et une augmentation des déformations thermiques. L'ampleur de la déformation dépend du type de béton, de la vitesse de chauffage et du taux d'humidité initial. L'étude de ce comportement est essentielle pour évaluer la sécurité des structures exposées aux incendies ou aux environnements thermiques extrêmes. [40]

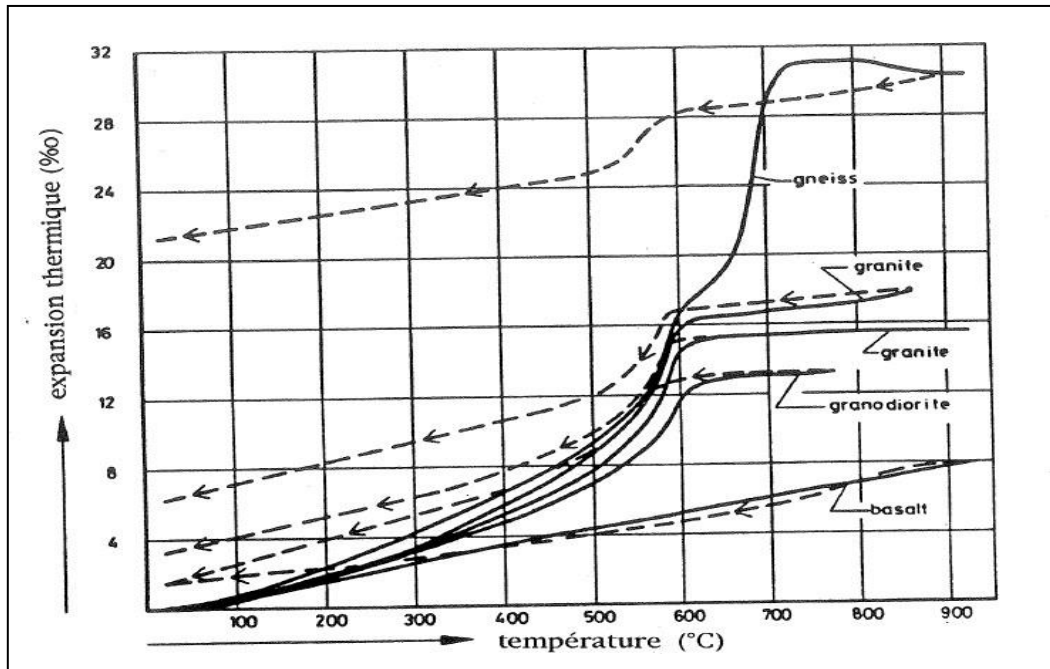


Figure 31 : Expansion thermique des granulats [40]

3.9 Conclusion :

D'après cette étude bibliographique, nous remarquons que les propriétés mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction, module d'élasticité) des bétons autoplaçants sont fortement influencées par les températures élevées, cette influence est remarquée aussi sur l'évolution de la matrice cimentaire (C-S-H) et sur les granulats des bétons.

Chapitre 04 :
Caractéristiques
des matériaux utilisés

4.1 Introduction :

Dans cette section, nous intéressons à la présentation des matériaux utilisés pour la confection des différents mélanges des BAP étudiés, d'essais réalisés et la méthodologie adoptée lors du travail de recherche expérimentale.

4.2 Caractérisations des matériaux :

Les essais sur les matériaux utilisés pour la confection du béton ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de M'Sila. Les matériaux utilisés sont :

- ✓ **Le sable** d'origine siliceux provenant DE DJAMAA WILAYA d'OUED SOUF
- ✓ Deux fractions de **gravier concassé (3/8 , 8/16)** l'origine calcaire COSSIDER à (ELECHE) BBA.

Ciment CEM 42.5R et provenant de la Biskria Ciment de « BSKRA »

- ✓ **L'adjuvant : NOVUPERFLOW** super plastifiant haut réducteur d'eau provenant de la SARL CHEMICAL INNOVATION – Ouled Bellil -- w Bouira.
- ✓ **L'ajout :** le filler (Déchets de poudre de verre de fraction 0,08mm)
- ✓ **L'eau** de gâchage et de conservation : eau potable du laboratoire.

4.3 Analyse granulométrique : [NF EN 933-1]

4.3.1 Sable :



Figure 32 : Un vibro- électrique. Tamis

Tableau 04 : Analyse granulométrique du sable de djamaa:

Tamis	Tares (kg)	Refus+tares (g)	Refus partiels(g)	Refus cumulés		Tamisât(%)
				(g)	(%)	
5	0.870	870	0	0	0	100
2.5	0.752	771	19	19	0.95	99.05
1.25	0.652	750	98	117	5.85	94.15
0.63	0.621	1841	1220	1337	66.85	33.15
0.315	0.559	1027	468	1805	90.25	9.75
0.16	0.517	683	166	1971	98.55	1.45
0.08	0.505	532	27	1998	99.9	0.1
fond	0.565	567	2	2000	100	0

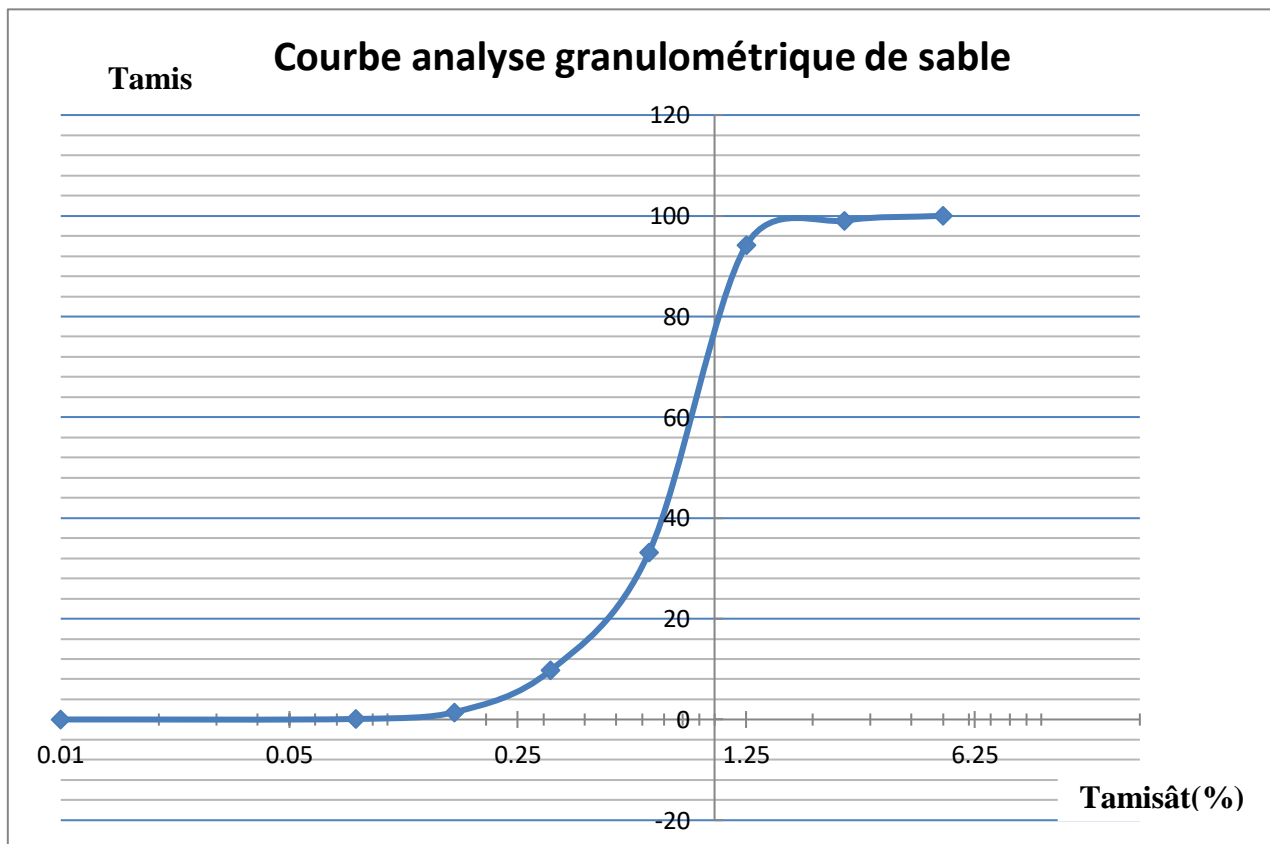


Figure 33: courbe d'analyse granulométrique de sable djamaa

4. 3.2Gravier (3/8) :

Tableau 05: Analyse granulométrique de gravier (3/8) :

Tamis	Tares (kg)	Refus+tares (g)	Refus partiels(g)	Refus cumulés		Tamisât(%)
				(g)	(%)	
10	0.586	0.591	4	4	0.26	99.74
8	0.638	0.782	142	146	9.73	90.27
6.3	0.638	1.693	1050	1196	79.73	20.27
5	0.655	0.796	137	1333	88.86	11.14
4	0.603	0.698	91	1424	94.93	5.07
3.15	0.608	0.656	42	1466	97.73	2.27
2.5	0.596	0.603	5	1471	98.06	1.94
fond	0.451	0.485	29	1500	100	0

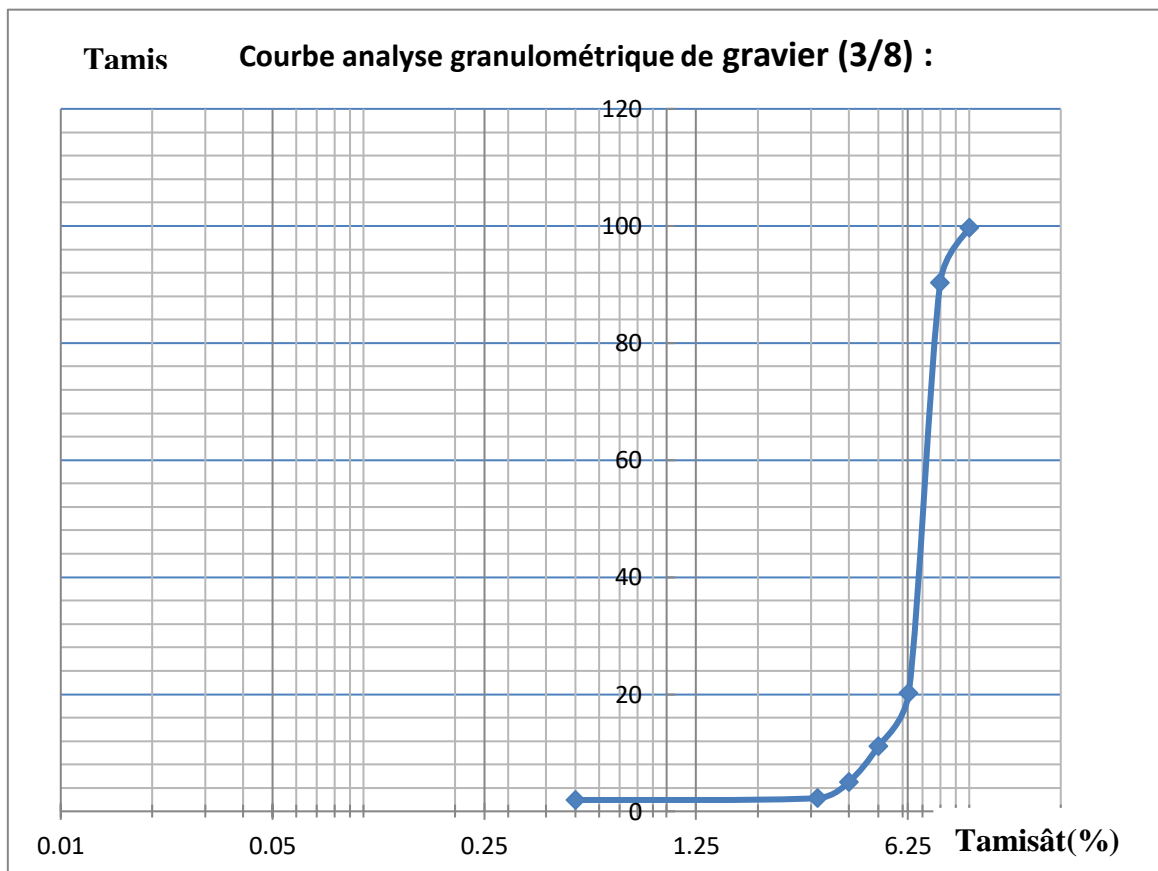


Figure 34: Courbe analyse granulométrique de gravier (3/8) .

4.3.2 Gravier (8/16):

Tableau06 : Analyse granulométrique de gravier (8/16) :

Tamis	Tares (kg)	Refus+tares (g)	Refus partiels(g)	Refus cumulés		Tamisât(%)
				(g)	(%)	
20	0.670	677	7	7	0.46	99.54
16	0.592	645	53	60	4	96
12.5	0.578	989	411	471	31.4	68.6
10	0.586	1209	623	1094	72.93	27.07
8	0.638	985	345	1439	95.93	4.07
6.3	0.638	693	56	1495	99.6	0.4
fond	0.451	452	2	1500	100	0

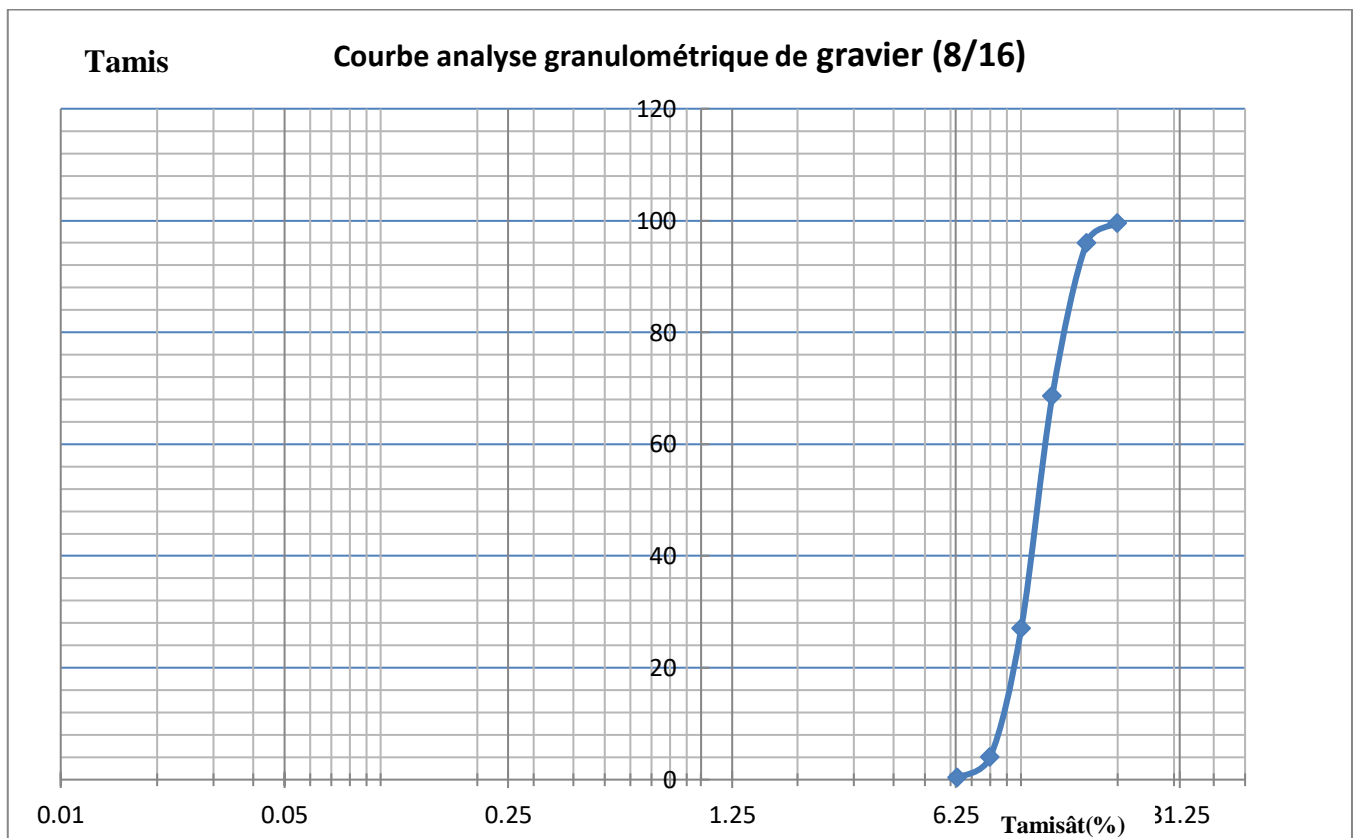


Figure 35: Courbe Analyse granulométrique du gravier (8/16).

4.4 Equivalent de sable : [NF EN 933-8]

L'équivalent de sable est un indicateur, caractérisant la propriété d'un sable. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur.

Mode opératoire :

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500g)
- Prendre une pesée de 120g
- Remplir l'éprouvette de solution lavant jusqu'au premier repère
- A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai dans l'éprouvette et fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main de chasser les bulles d'air
- Laisser reposer pendant 10 minutes
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de course horizontale en 30 secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique
- Retirer le bouchon, le rincer avec la solution lavant au-dessus de l'éprouvette, rincer ensuite les parois de cette dernière
- Faire seconder le tube lavant dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage, cette opération pour but de laver le sable et de faire montrer les éléments fins et argileux.
- Effectuer cette opération jusqu'à ce que la solution lavant atteigne le 2^e repère, laisser ensuite reposer pendant 20 minutes

4.4.1 Equivalent de sable visuel (E.S.V) :

- Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieur du flocculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.
- Mesurer également avec le réglet la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

On a :

$$\text{E.S.V} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \cdot 100(\%)$$

h_1 : la hauteur du sable + flocculat,

h_2 : la hauteur de sable ($h_2 < h_1$)

4.4.2 Equivalent de sable piston(E.S.P):

Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, cet instant bloquer le manchon du piston, et sortir celui-ci l'éprouvette.

- Introduire la règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston, soit h'2 la hauteur lue et correspondant et la hauteur le partie sédimentée.

$$E.S.P=(h'2/h1)/100(\%)$$

On a :

h1: la hauteur du sable +floculat,

h'2: la hauteur du sable ($h'2 < h1$)

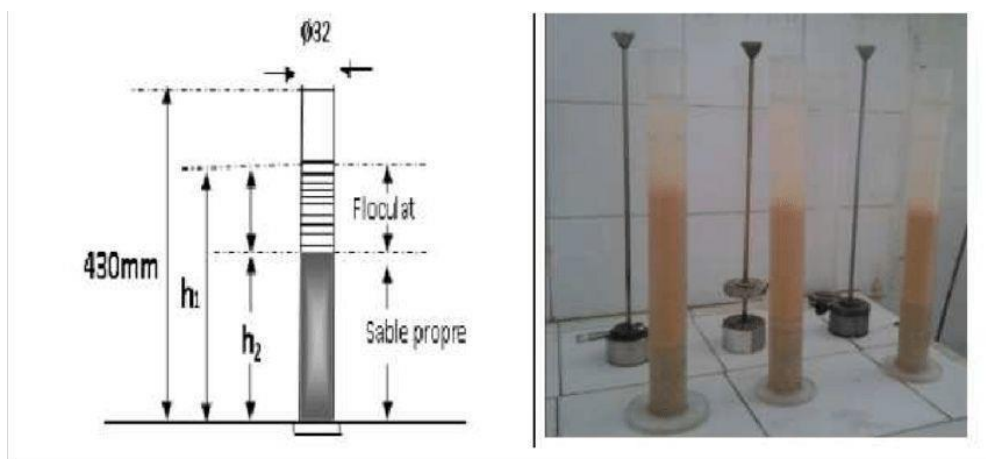
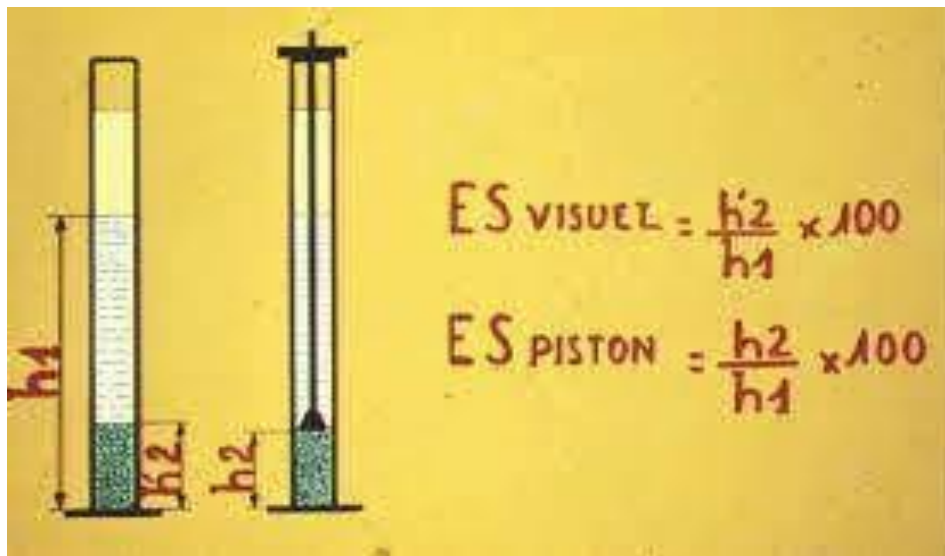


Figure 36: Principe de l'équivalent de sable.

Tableau 07: La classification de la nature sable en fonction d'équivalent de sable (E.S)

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
ES<65	ES<60	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65<ES<75	65<ES<70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75≤ES≤85	70≤ES≤80	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de hautes qualité.
E.S≥85	E.S>80	Sable très propre : L'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableaux 08 : Equivalent de sable

Essais	h1(cm)	h2(cm)	E.S.V(%)	h'2(cm)	E.S.P(%)
Essai 1	11	9	81.81	8.7	79.09
Essai 2	10.9	8.9	81.65	8.6	78.89
Essai 3	11.4	8.8	77.19	8.7	76.31

(E.S.V) moy = 80.21

(E.S.P) moy = 78.09

4.5 Caractéristiques physiques du sable et Gravier :

4.5.1 La masse volumique absolue sable : [NF EN 1097-7]

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieure des grains exclus), après passage à L'étuve à 105°C, notée et exprimée en (g/cm³, kg/m³, T/m³)

Mode opératoire :

- peser un échantillon sec M=300g de granulats
- Remplir éprouvette échantillon gradué avec un volume d'eau V1=300ml

- Introduire les granulats dans l'éprouvette graduée en chassant les bulles d'air lire le nouveau volume V2
- Calculer la masse volumique absolue $\rho_{abs} = M/V_1 - V_2$
- Refaire la mesure 3 fois

Tableau 09: Masse volumique absolue du sable de djamaa

Essais	M(g)	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)	Moyenne
Essai 1	300	300	425	2.40	2.53 (g/cm ³)
Essai 2	300	300	415	2.60	
Essai 3	300	300	415	2.60	

4.5.2 La masse volumique apparente sable : [NF EN 1097-6]

La masse volumique à l'état lâche : ρ_{abs} (g/cm³)

- On détermine la masse volumique apparente du sable d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2,5l
- On remplit l'entonnoir avec du sable sec
- On pèse le récipient de capacité de 1 L, soit M1 ce poids
- On place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15cm, et on le remplit avec du sable.
- On nivelle la surface du sable et on pèse le tout, soit M2 ce poids

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V_r$$

d'où :

V_r = volume de récipient

Tableau 10: La masse volumique apparente à l'état lâche VR=1000 ml

Essais	M1(g)	M2(g)	ρ_{app} (g/cm ³)	Moyenne
Essai 1	218	1831.11	1.61	1.61 (g/cm ³)
Essai 2	218	1828.7	1.61	
Essai 3	218	1836.6	1.62	

4.5.3 La masse volumique apparente Gravier: [NF P 18-554]

Le principe de cette mesure s'agit de remplir un récipient de volume intérieur connu de peser la quantité de granulat correspondant.

Mode opératoire :

- Verser les granulats dans le récipient choisi et le disposer sous tassement par les couches horizontales successives.
- Araser la couche supérieure des granulats à l'aide d'une règle, la masse volumiques est déterminée par la formule suivant :

○ $\rho_{app} = (M_2 - M_1) / V$

D'où :

Vr : volume du récipient

M₂ : poids de l'ensemble (granulat + récipient) **M₁** : poids du l'ensemble

Tableaux11 : la masse volumique apparente du gravier :

Essais	Gravier	V(cm ³)	M1(g)	M2(g)	Papp(g/c m ³)	Moyenne
Essai 1	3/8	1000	115	1312.2	1.30	1.30
Essai 2			115	1319	1.30	
Essai 3			115	1323	1.30	
Essai 1	8/16	1000	115	1297	1.30	1.26
Essai 2			115	1307	1.30	
Essai 3			115	1251	1.20	

4.5.4 La masse volumique absolue du gravier :

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieure des grains exclus), après passage à l'étuve à 105°C, notée et exprimée en (g/cm³, kg/m³, T/m³)

Mode opératoire :

- peser des échantillons sec : M₁ = 200g / M₂ = 200g / M₃ = 200g de granulats Remplir l'éprouvette échantillon gradué avec un volume d'eau V₁= 200 ml
- Introduire les granulats dans l'éprouvette graduée en chassant les bulles d'air
- lire le nouveau volume V₂
- Calculer la masse volumique absolue pabs =M/V₂-V₁
- Refaire la mesure 3 fois

Tableaux 12 : la masse volumique absolue du gravier :

Essais	Gravier	M(g)	V1(cm ³)	V2(cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)	Moyenne
Essai 1	3/8	300	300	410	2.72	2.76 (g/cm ³)
Essai 2			300	410	2.72	
Essai 3			300	405	2.85	
Essai 1	8/16	300	300	410	2.72	2.68 (g/cm ³)
Essai 2			300	415	2.6	
Essai 3			300	410	2.72	

4.6 VERRE:

Du point de vue économique, le recyclage du verre est une pratique essentielle qui permet de préserver les ressources naturelles et l'énergie utilisées dans sa production. En effet, le verre recyclé peut être réutilisé dans diverses industries telles que l'emballage et la construction, ce qui réduit à la fois les coûts environnementaux et économiques liés à l'utilisation de nouvelles matières premières.

Investir dans la technologie de recyclage du verre et améliorer ses opérations sont des éléments clés de l'approche économique de gestion des déchets. Cela permet d'améliorer l'efficacité des ressources et de minimiser les impacts environnementaux de l'élimination traditionnelle du verre.

Tableau 13 : Composition du verre.

Composant	Formule chimique	Rôle principal	Pourcentage approximatif
Silice	SiO ₂	Forme la matrice du verre (réseau vitreux)	70–75%
Oxyde de sodium	Na ₂ O	Réducteur du point de fusion	12–15%
Oxyde de calcium	CaO	Stabilisateur chimique	8–12%
Oxyde de magnésium	MgO	Améliore la durabilité	0–4%
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	Renforce la structure	0–2%
Autres (Fe ₂ O ₃ , K ₂ O, etc.)	Divers	Donnent des propriétés spécifiques (couleur...)	<1%

Tableau 14: Masse volumique absolue du verre :

Essais	M(g)	V1(cm ³)	V2(cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)	Moyenne
Essai 1	200	200	238	2.40	2.37 g/cm ³
Essai 2	200	200	238	2.40	
Essai 3	200	200	241	2.32	

Tableau 15 : Masse volumique apparente du verre

Essais	M1(g)	M2(g)	ρ_{app} (g/cm ³)	Moyenne (g/cm ³)
Essai 1	218	1471	1.25	1.26
Essai 2	218	1488	1.27	
Essai 3	218	1486	1.26	

4.7 Adjuvant(NOVSUPERLOW) :

Tableau 16: Caractéristique de l’adjuvant« NOVSUPERLOW ».

Etat physique à 20 c °	Couleur	PH à 20°C	Densité	Teneur en Chlorure	Extrait sec
Liquide	Brun	5 – 6	1.05 ±0.02	< 1 g/l	23%

Tableau 17 : Propriétés de « NOVSUPERLOW » à l’état frais et durci.

«NOVSUPERLOW » à l’état frais	« NOVSUPERLOW » à l’état durci
Obtention un rapport E/C très faible	Augmenter la résistance mécanique à jeune âge et à long terme.
Amélioré la fluidité et la maniabilité	diminuer la porosité
Eviter la ségrégation et facilité la mise en Ouvre	Diminuer le retrait et le risque de fissuration

4.8 Le ciment :

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment portland composé de classe 42.5R provient de la cimenterie de Biskria Ciment de « BSKRA »:

4.8.1 Caractéristiques du ciment CEM I 42,5R :

Caractéristiques physiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé [NF EN 196-1], (2002) Tableau 18 :

Tableau 18 : Les compositions chimiques du CEM I 42.5R

Oxyde	SiO2	AL2O3	CaO	Fe2O3	Mgo	So3	Na2O
Teneur	20.7	4.75	62.92	3.75	1.90	1.98	0.09

Tableau 19: Caractéristiques Techniques du CEM I 42,5R.

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	2.6 – 3.7
Teneur en sulfates (SO3)	2.2 – 2.8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 – 2.8
Teneur en Chlorures (Cl ⁻)	0.03 – 0.07
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	valeur
C ₃ S	56 – 66
C ₃ A	5.1 – 7.2
Propriétés physiques	valeur
Consistance normale (%)	25.8 – 26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25 – 1.0
Temps de prise (min)	valeur
Début de prise	150 – 190
Fin de prise	220 – 250
Résistance à la compression	valeur
2 jours (MPa)	20 – 29
28 jours (MPa)	42.5 – 52.5



Figure 37 :Ciment portland CEM I 42.5R

Tableaux 20 : Caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage

La mesure	Teneur en eau (mg/l)
Degré de température	24.7
PH	7.78
Conductibilité	1799
Chlore Cl⁻	234.3
Sulfate SO⁴	351.6
Magnésium Mg²⁺	110.8
Calcium Ca²⁺	267.2
Sédiment sec	1412
Eligibilité d'oxydation en eau	1024

4.9 Conclusion :

Le chapitre 4 vise à décrire les matériaux utilisés localement, nous présentons les propriétés chimiques, physiques et mécaniques utilisées pour fabriquer le béton (ciment, sable, gravier, fillers), qui ont été testées au laboratoire de génie civil de l'Université de M'sila.

Sur la base des résultats obtenus, après avoir caractérisé les différents composants (sable, gravier, ciment, fillers), nous avons conclu que ces matériaux peuvent être utilisés dans le béton. En général, et le BAP en particulier.

Chapitre 05 :
Techniques Expérimentales
des BAP

5.1 INTRODUCTION :

La partie expérimentale est un prolongement de la partie théorique pour équilibrer le programme de travail et définir les différentes techniques expérimentales. Dans cette section, nous montrons principalement la formulation pour le calcul de dosage de BAP, et essais de base à l'état frais ou durci pour caractériser ce type de béton qui nous choisissons.

Ces tests sont effectués dans des laboratoires de l'université de M'Sila.

5.2 Calcul des constituants d'un BAP (selon les recommandations de l'AFGC):

5.2.1 Préparation de la gâchée :

La préparation du béton auto plaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules prismatique et cubique nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, sinon les sécher préalablement dans l'étuve.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le super plastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment) et les introduire dans le malaxeur.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première un quart de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant).
- Ajouter les trois quart d'eau graduellement.
- Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- pour un BAP avec déchets de verre les pourcentages de poudre varient de **5 %** et **10%**.
- Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration.

Conservation des éprouvettes :

Après le gâchage pour un béton ordinaire ou pour un BAP, les moules sont Conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après **48h** d'hydratation du ciment.

Formulation de béton auto plaçant :

Pour la formulation du béton auto plaçant nous n'avons pas suivi une formulation classique

Nous avons respecté les conditions nécessaires permettant de garantir l'autoplaçabilité tout en se basant sur des compositions proposées dans la littérature spécialisée.

Il s'agit de choisir les proportions des constituants dans 1m³ de béton en ayant comme données les paramètres suivants :

- Un rapport **G/S** = 1.
- Un rapport **E/C** = 0.5.
- Un dosage en ciment plutôt élevé **C = 420 kg /m³**
- Un pourcentage déterminé en ajouts (super plastifiant, les fillers, ou encore les deux). Le filler **F=10%*C**, et le super plastifiant **NOVSUPERFLOW =1.5 %*C**

5.2.2 Formulation de béton autoplaçant :

$$G + S + C + E + F + SP = 1000 \text{ liters}$$

Avec:

$$E/C = 0.5 \Rightarrow E = 420 * 0.5 = 210 \text{ kg/m}^3$$

La masse volumique de l'eau est 1000 kg/m³ ce qui implique que

$$E = 210 \text{ l/m}^3$$

Si on prend un dosage en F de 10% C on a

$$F = 10\% * C = 420 \text{ kg/m}^3 * 10\% = 42 \text{ kg/m}^3$$

Le dosage du super plastifiant est : $1.5\% * (C+F) = 1.5\% * (420+42) \text{ kg/m}^3 = 6.3 \text{ kg/m}^3$

La densité absolue du super plastifiant **Novsuperlow** est égale à 1.05

Ce qui nous donne en terme de volume : $6.3 / 1.05 = 6 \text{ l/m}^3$

La densité absolue du ciment est égale à 3.1

Le volume du ciment est : $420 / 3.1 = 135.48 \text{ l/m}^3$

On peut calculer les proportions des graviers et du sable :

Le volume de la pate pour 1m³ de béton est :

$$C + E + F + SP = 135.48 + 210 + 42 + 6 = 393.56 \text{ litres}$$

Le volume des granulats pour 1m³ de béton est :

$$G + S = 1000 - 393.56 = 606.44 \text{ litres}$$

Avec **G/S** = 1

$$\text{On a donc: } G = S = 303.22 \text{ l/m}^3$$

Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser 50% de G8/16 et 50% du G 3/8

$$\text{Gravier (3/8) : } 50\% = 151.61 \text{ l/m}^3$$

Gravier (8/16) : 50% = 151.61 l/m³ et pour le Sable : **S = 303.26 l/m³** En terme de poids on a :

Gravier (3/8) = $162.13 * 2.67 = 432.88 \text{ kg/m}^3$

Gravier (8/16) = $162.13 * 2.68 = 434.51 \text{ kg/m}^3$

Sable = $324.26 * 2.627 = 849.56 \text{ kg/m}^3$

Les déchets de verre :

Des bouteilles en verre ou bien déchets industriels.

Les pourcentages proposés : 0% ; 5% et 10%

Tableau 21: Composition d'une mètre cube de béton autoplaçant.

Constituants	Quantité en volume (l/m ³)	Quantité en masse Kg/m ³
Sable	849,56	25.486
Gravier 3/8	432,88	12.980
Gravier 8/16	434,51	13.035
Ciment	420	12.600
Eau	210	6.3
Super plastifiant	6,3	0.189

5.2.3 Les compositions des différents bétons :

BAP1 : Béton Auto plaçant avec 0 % de Déchets de Verre.

BAP2 : Béton Auto plaçant avec 5 % de Déchets de Verre.

BAP3 : béton Auto plaçant avec 10 % de Déchets de Verre.

5.3 Procédure de fabrication des éprouvettes:

Des échantillons sont fabriqués, testés dans le laboratoire des matériaux de construction réalisée dans le même laboratoire à Université de M'sila la préparation du béton autoplaçant par rapport à la préparation du béton ordinaire demande plus détermination et de précision. Après avoir possédé pour déterminer le ratio de chaque ingrédient, suivez la procédure ci-dessous :

- vérifiez d'abord la quantité et l'état des moules prismatiques et cubiques nécessaires Pour les essais, ce dernier doit être lubrifié avec de l'huile pour faciliter le démouillage.
- Rassemblez tout le matériel nécessaire pour effectuer le test. Vérifier que le matériau n'est pas mouillé, s'il n'a pas été séché au préalable.
- Pour préparer la quantité d'eau requise pour le mélange. ajouter le super plastifiant à

1/4 d'eau mélangée.

- Peser et introduire des matériaux secs (gravier, sable, ciment, poudre de verre) dans le malaxeur et mixer.

La fabrication des gâchées est effectuée dans un malaxeur à axe vertical de capacité 30L un mode opératoire strict et identique est suivi :

- Brassage à sec du mélange sable + Gravier + ciment + poudre de marbre pendant 30s.
- Ajout de l'eau + supe plastifiant 210s.
- Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration pour le béton auto plaçant.

5.4 Équipements utilisés :

Dans le programme expérimental on a utilisé :

- Une balance.
- Un malaxeur.
- Les outils de maçonnerie tels que : La règle, récipient, une truelle, la brouette, moule.....
- Le cône d'Abrams pour mesurer l'affaissement.
- Une machine d'essai « une presse de force », de dimension appropriée à l'éprouvette à tester et répondant aux prescriptions des normes **NF P 18-411 et NF P 18-412.**



Le malaxeur



La machine de traction



La machine de compression



Le four

Figure 38: Appareillage de laboratoire.

5.5 Essais de caractérisation du béton autoplaçant à l'état frais :

Le béton auto plaçant à l'état frais a fait objet de nombreuses recherches dans le domaine des matériaux de construction ces dernières années, parmi les essais les plus couramment utilisés pour caractériser le béton frais auto plaçant on peut citer :

- La détermination de la consistance au cône d'Abram's.
- la détermination du risque de blocage à aide de la boîte L.
- la détermination de la résistance à la ségrégation par évaluation de la stabilité tamis.

5.5.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams (NF EN 12 350-8):

Essai d'étalement est imposé comme l'essai le plus simple à exécuter, et il est possible de mesurer la cohérence du béton, Cet essai est effectué comme l'essai d'affaissement au cône d'Abrams cette expérience permet également de découvrir si une séparation horizontale se produit cet essai, qui peut être réalisé sur le site, ne nécessite que de petites échantillons en béton, la valeur de 60 à 75 cm est généralement destinée à obtenir BAP.

5.5.1.1 Matériel utilisé :

- Une plaque carré 120 centimètres de côté ;
- Un cône d'Abram's ;
- Une règle de centimètres.

5.5.1.2 Mode opératoire :

-Placer la plaque sur un support stable et horizontal

On mouille la surface de la planche pour éviter que le béton n'y colle, et on essuie excès d'eau avec un chiffon ;

Placer le cône d'Asrams au centre de la planche, en coulant le béton de manière continue, jus que au sommet du cône ;

Araser si nécessaire avec une truelle et nettoyer le panneau si nécessaire avec un chiffon humide ; On soulève le cône verticalement avec des contacteurs ;

Une fois le béton étalé sur la table, nous mesurons le diamètre final sur des côtés spécifiques ;

Et notez les deux valeurs. Si les deux valeurs diffèrent de plus de 5 cm, le test doit être invalidé et renouvelé ; Le résultat final est évaluateur moyen obtenu. Soit : $\text{pendage débit} = (D1 + D2) / 2$.



Figure 39: Essai d'étalement au cône d'Abram's

5.5.2 Essai de la boîte en « L » :

Cet essai est exécuté à l'aide d'une boîte en forme de L. Les tests spécifiques sont autorisés dans un environnement limité et confirment que la création de béton n'est pas entravée par des phénomènes de bloc inacceptables, tels que l'existence d'armatures.

Le principe de cet essai est le suivant.

La partie verticale de la boîte doit être entièrement remplie de béton, où la partie horizontale de la boîte à travers le renfort le béton a cessé de couler, ensuite, l'ouverture est surélevée et le béton est autorisé à s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers l'armature, lorsque le béton ne coule plus, on mesure la hauteur H1 et H2.

5.5.3 Stabilité au tamis :

Cet essai vise à vérifier la résistance du BAP à la ségrégation, c'est-à-dire sa capacité à maintenir une distribution homogène des composants sans que les granulats ne se séparent de la pâte de ciment. La méthode standard pour cet essai est la suivante :

Préparation de l'échantillon : Prélever un échantillon représentatif du béton auto plaçant frais.

- **Tamisage** : Verser le béton à travers un tamis standard (généralement de 5 mm ou 8 mm de maille) placé au-dessus d'un récipient.
- **Pesée** : Peser le béton qui passe à travers le tamis et celui qui reste dessus.
- **Calcul de la stabilité** : Calculer le pourcentage de béton passant à travers le tamis. Un faible pourcentage indique une bonne stabilité (faible ségrégation).

Les normes spécifiques et les seuils de tolérance peuvent varier, mais en général, un béton auto plaçant de haute qualité doit avoir un pourcentage de passage bas, généralement inférieur à 15 %.

Peser le fond avec la laitance :

On a: $P_{\text{laitances}} = P_{\text{fond}} + \text{laitance} - P_{\text{fond}}$ • Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon.

• $d = (P_{\text{laitance}} / P_{\text{échantillon}}) * 100$.



Figure 40 : Principe de l'essai stabilité de tamis sur BAP

5.5.4 La masse volumique :

La masse volumique (densité) du béton frais est une autre propriété essentielle, influençant la résistance et la durabilité du béton durci. L'essai de masse volumique suit généralement ces étapes :

- **Préparation du matériel :** Utiliser un récipient de volume connu (généralement un cylindre ou un seau) et une balance précise.
- **Remplissage du récipient :** Remplir le récipient avec le béton frais en évitant les poches d'air.
Nivellement : Nivelier la surface du béton dans le récipient pour assurer une mesure précise.
- **Pesée :** Peser le récipient rempli de béton.

Calcul de la masse volumique : La masse volumique est calculée en divisant la masse du béton par le volume du récipient. La formule est :

Masse volumique = Masse du béton (kg) / Volume du récipient (m³)

La masse volumique typique pour le BAP se situe généralement entre 2200 et 2500 kg/m³.



Figure 41: La masse volumique

5.6 Essais de caractérisations du béton auto plaçant à l'état durci :

5.6.1 Essai compression (NF EN 12390-3) :

La résistance est déterminée après **30 jours** et après exposition du béton à la haute température par la formule : $R = F/S$

On a:

S: section de l'éprouvette : 100 cm² F: force au moment de la rupture.



Figure 42: Essai compression : a) machine et éprouvette, b) éprouvette destructeur

5.6.2 Essais de traction par flexion : (NF EN 12390-5)

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages. Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont propre uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 7x7x28 cm. La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante :

$\sigma = Mf$ et la relation du moment de flexion s'écrit

$$Mf = F \cdot L/4:$$

Où

F : Charge de rupture, L : Portée, I : Inertie de flexion et a : Côté du prisme.



Figure 43:essai de traction et flexion et éprouvette

5.7 Confection des éprouvettes :

5.7.1 Type et tailles des moules :

Les moules, utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules en acier et plastique de forme (Figure 44)



Prismatique (7x7x28 cm³)



Cubique (10x 10x 10 cm³)

Figure 44 : Les moules, utilisés

5.7.2 Conservation des éprouvettes :

Le démoulage de toutes les éprouvettes a été effectué 48h après le collage puis conservées sous l'eau à une température de 20+ 2°C.



a)



b)

Figure 45 : Type des éprouvettes utilisés : a) cubique , b) prismatique

5.8 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons décrit tous les essais réalisés, soit à l'état frais ou durci, une description sur le protocole de conception de ce type de béton ainsi que les formules de calcul et les critères fondamentaux de chaque essai.

Chapitre 06 :
Résultats et Analyses.

6.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des résultats d'essais rhéologiques, physiques et mécaniques réalisés sur un béton auto plaçant additionné par un type d'ajouts (poudre de verre) selon des différents pourcentages (0% ,5%, 10%) ceci, pour voir l'influence de poudre de verre et son pourcentage sur les propriétés du BAP à l'état frais et à l'état durci.

6.2 Les formulations des bétons étudiés :

- **BAP 0%V** → Béton auto plaçant avec l'ajout de 0% poudre de verre
- **BAP 5%V** → Béton auto plaçant avec l'ajout de 5% poudre de verre
- **BAP 10%V** → Béton auto plaçant avec l'ajout de 10% poudre de verre

6.3 Présentation des résultats :

Dans cette partie, nous allons discuter les résultats obtenus d'après les essais exécutés afin de caractériser les BAP confectionnés, en deux états essentiels frais et durci à partir des mélanges obtenus suivant les tests recommandés et déclarés par l'**AFGC**

6.3.1 Résultats des essais à l'état frais :

Premièrement on a présenté les résultats à l'état frais, qui on a obtenir juste après le gâchage pour caractérisée ce type de béton. Qui permet d'étudié les propriétés du BAP à l'état frais par :

- Essai de cône d'Abrams (essai d'étalement pour les milieux non confiné) [NF EN 12350 – 8].
- Essai boîte en L. (contrôlée l'écoulement dans les milieux confiné) [NF EN 12350 – 10].
- Essai de stabilité au tamis (pour étudier la ségrégation) [NF EN 12350 – 11].

Tableaux 22 : Résultats des essais à l'état frais

	Étalement (cm)	Stabilité au tamis (%)	Boite en L (h2/h1) (%)
BAP 0 % V	72	7.75	8.80
BAP 5% V	74	8.87	8.5
BAP 10%	73	6.22	9

6.3.1.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams :

L'objectif de cet essai est la vérification de la capacité du béton à s'auto écouler de manière homogène.

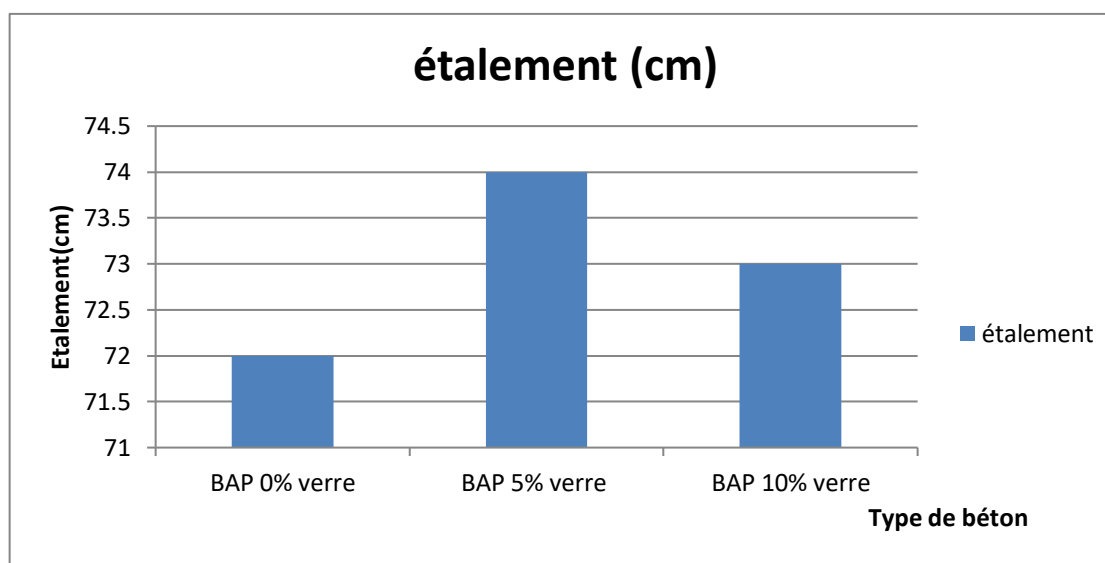


Figure 46 : L'étalement en fonction du type de béton.

Commentaire :

La valeur de l'étalement est généralement définie entre 65 et 75 cm, et on observe que tous les types de béton (BAP) fluctuent entre ces deux valeurs.

Les résultats du test de l'étalement ont montré que l'ajout de 5 % de poudre de verre au BAP améliorerait significativement la maniabilité, avec une valeur de l'étalement supérieure à celle du mélange de référence. Ceci peut s'expliquer par le fait que la poudre de verre, avec sa surface lisse et sa faible absorption d'eau, augmente la fluidité du béton. Cependant, l'augmentation du pourcentage à 10 % a entraîné une légère diminution de l'étalement, indiquant l'apparition d'un effet négatif dû à l'excès de matière fine. Ces résultats démontrent l'importance de déterminer le ratio de verre optimal pour atteindre un équilibre entre fluidité et stabilité.

6.3.1.2 Essai de la boîte en L :

L'objectif de cet essai est de déterminer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée, sans qu'il soit contrarié par des phénomènes de blocage inacceptable.

Les résultats obtenus de cet essai (pour les différents mélanges des bétons formulés) sont représentés sur la :

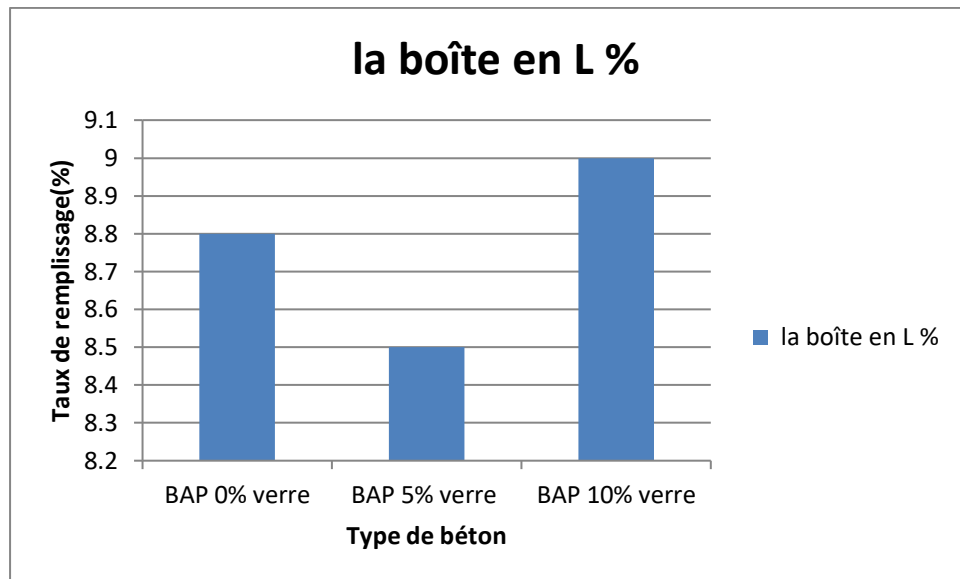


Figure 47 : Taux de remplissage en fonction du type de béton.

Commentaire :

L'essai est exploité au travers du taux de remplissage (rapport des hauteurs de béton à la fin et au début de la boîte) qui doit en principes être supérieur à 8 ou l'on note que tous les BAP vérifiés ce principe..

Une baisse est observée à 5 % de verre, traduisant une amélioration de la stabilité du BAP. À 10 %, une hausse du taux de remplissage est enregistrée, indiquant un risque de ségrégation accru. Ces résultats suggèrent qu'un dosage modéré du verre améliore la cohésion, tandis qu'un excès pourrait altérer la stabilité du mélange.

6.3.1.3 Essai de stabilité au tamis :

Cet essai caractérise la capacité d'un BAP à rester homogène après sa mise en place jusqu'au début de prise.

L'essai est celui dit " de stabilité au tamis " qui consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance d'un échantillon de béton passant à travers un tamis de 5 mm

Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en 3 classes.

- $0 < p \text{ laitance} < 15\%$ stabilité satisfaisante.
- $15 < p \text{ laitance} < 30\%$ stabilité critique.
- Laitance > 30 stabilité très mauvaise.

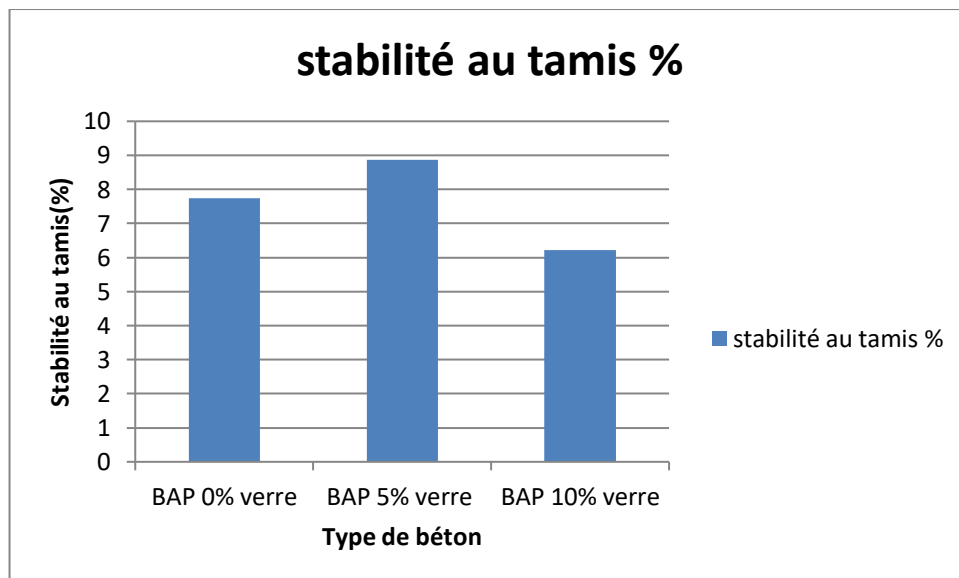


Figure 48 : Stabilité au tamis en fonction du type de béton.

Commentaire :

L'essai de stabilité au tamis révèle que l'ajout de 5 % de verre améliore la rétention des fines, avec un taux de stabilité plus élevé que le béton témoin. En revanche, à 10 %, la stabilité diminue nettement, indiquant un début de ségrégation du mélange. Cela suggère qu'un dosage modéré de verre renforce la cohésion, tandis qu'un excès nuit à la stabilité globale du BAP. L'optimisation du pourcentage de verre est donc cruciale pour maintenir la performance du béton.

6.4 Les essais de caractérisation des BAP à l'état durcis :

Tableaux 23 : Résistance à la compression et la traction par flexion avec le poids BAP 0%V

Résistance à la compression (éprouvette cubique 10*10*10)							
	température		Poids avant place dans l'eau (Kg)	Poids après place dans l'eau et Poids avant place dans four (kg)	Poids après place dans four (kg)	La Résistance	
BAP 0%V	20°	i1	2.289	2.322	/	40.60	
		i2			/		
		i3			/		
	200°	i4	2.358	2.386	2.301	49.80	
		i5					
		i6					
	400°	i7	2.253	2.280	2.153	43.11	
		i8					
		i9					
	600°	i10	2.300	2.328	2.149	33.05	
		i11					
		i12					
	Résistance à la traction par flexion (éprouvette prismatique 7*7*28)						
	20°	i1	3.226	3.263	/	Résistance=4.75 la charge=7.763	
		i2			/		
	200°	i3	3.247	3.283	3.167	Résistance=3.70 la charge=6.048	
		i4					
	400°	i5	3.261	3.295	3.124	Résistance=1.66 la charge =2.766	
i6							
600°	i7	3.423	3.460	3.230	Résistance=1.07 la charge =1.826		
	i8						
	i9						

Tableaux 24 : Résistance à la compression et la traction par flexion avec le poids

BAP 5%V

Résistance à la compression (épreuve cubique 10*10*10)							
	température		Poids avant place dans l'eau (Kg)	Poids après place dans l'eau Poids avant place dans four (kg)	Poids après place dans four (kg)	Résistance	
BAP 5%V	20°	i1	2.396	2.419	/	51.04	
		i2			/		
		i3			/		
	200°	i4	2.387	2.409	2.345	49.49	
		i5					
		i6					
	400°	i7	2.396	2.428	2.298	56.63	
		i8					
		i9					
	600°	i10	2.384	2.416	2.256	39.01	
		i11					
		i12					
	Résistance à la traction par flexion (épreuve prismatique 7*7*28)						
	20°	i1	3.417	3.463	/	/	Résistance=4.62 la charge =7.560
		i2					
200°	i3	3.428	3.477	3.360	/	Résistance=4.36 la charge =7.208	
	i4						
400°	i5	3.445	3.489	3.309	/	Résistance=1.55 la charge =2.551	
	i6						
600°	i7	3.407	3.455	3.248	/	Résistance=0.83 la charge =1.482	
	i8						
	i9						

Tableaux 25 : Résistance à la compression et la traction par flexion avec le poids BAP 10%V.

Résistance à la compression (éprouvette cubique 10*10*10)							
	température		Poids avant place dans l'eau (Kg)	Poids après place dans l'eau Poids avant place dans four (kg)	Poids après place dans four (kg)	Résistance	
BAP 10%V	20°	i1	2.412	2.363	/	50.82	
		i2			/		
		i3			/		
	200°	i4	2.381	2.402	2.334	48.73	
		i5					
		i6					
	400°	i7	2.377	2.400	2.274	54.28	
		i8					
		i9					
	600°	i10	2.381	2.404	2.256	42.15	
		i11					
		i12					
	Résistance à la traction par flexion (éprouvette prismatique 7*7*28)						
	20°	i1	3.395	3.424	/	Résistance=4.71 la charge =7.704	
		i2					/
200°	i3	3.432	3.457	3.360	Résistance=3.95 la charge =6.457		
	i4						
400°	i5	3.380	3.421	3.242	Résistance=1.41 la charge =2.328		
	i6						
600°	i7	3.438	3.473	3.244	Résistance=0.98 la charge =1.621		
	i8						
	i9						

6.4.1 Résistance à la compression :

Dans cette partie, on a étudié l'influence de poudre de verre sur la résistance à la compression des BAP, pour cela, trois dosages différents ont été utilisés (0% et 5% et 10% par rapport au poids du ciment) et ceci pour des durées de durcissement de plus 30 jours puis exposition aux différentes températures (200, 400, 600°C).

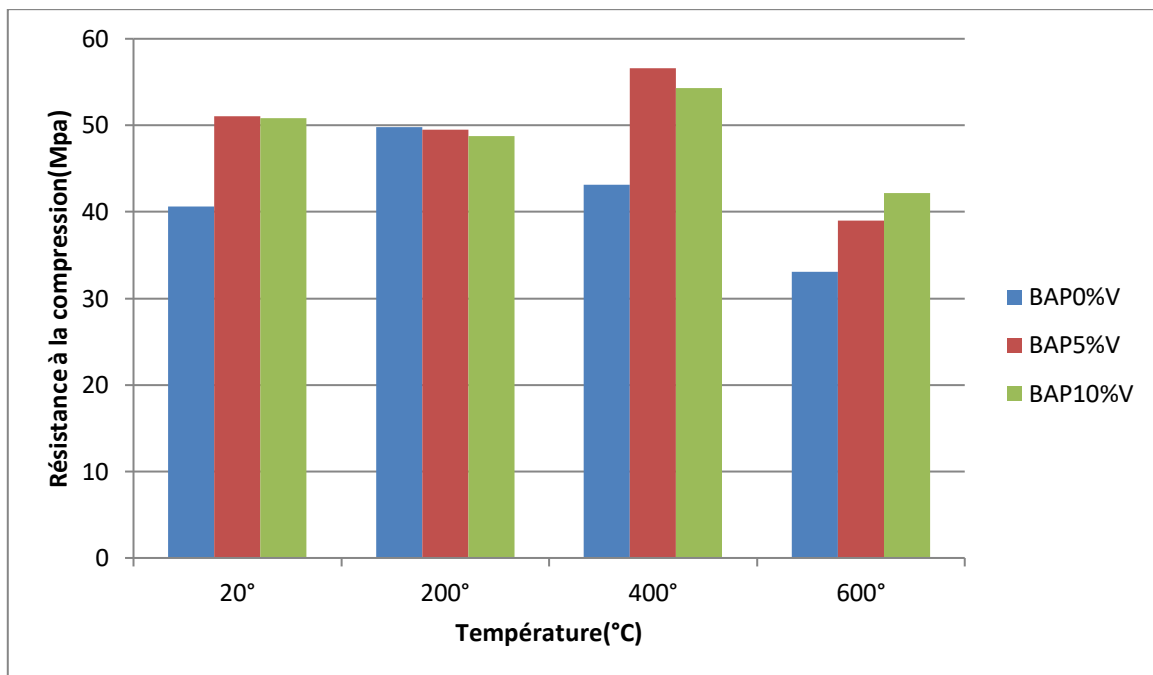


Figure 49 : Evolution de la Résistance à la compression en fonction du type du béton exposé à la haute température.

Commentaire :

Le graphique montre l'effet de différentes températures sur la résistance du béton avec des pourcentages de BAP dans des échantillons cubique 10*10*10. On observe que l'ajout de BAP à 5 % et 10 % améliore la résistance du béton à des températures élevées, en particulier à 400°, où l'augmentation est significative par rapport à l'échantillon témoin (BAP 0 %). À 200°, les différences sont minimales, ce qui indique que l'effet du BAP devient plus apparent à des températures plus élevées. De plus, le BAP à 10 % présente de meilleures performances à 600°, démontrant son efficacité pour améliorer la résistance thermique du béton.

6.4.2 Résistance à la traction :

Les résultats obtenus à partir d'essais de traction par flexion sont représentés sur la **Figure 50**.

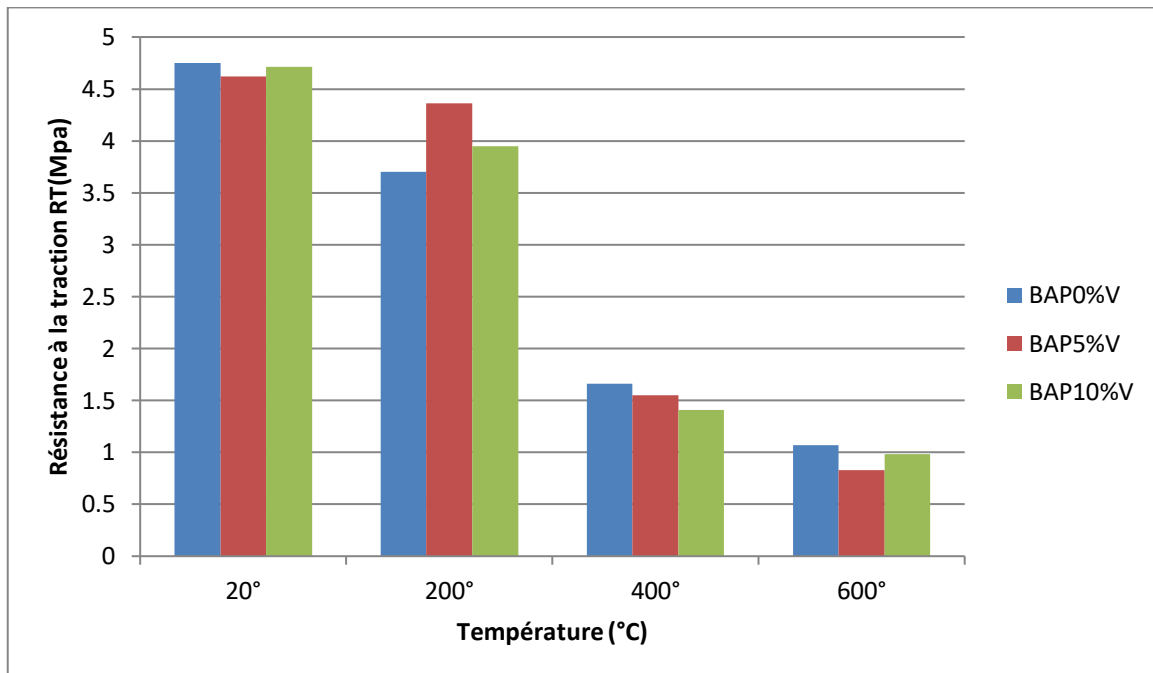


Figure 50 : Evolution de la Résistance à la traction en fonction du type du béton exposé à la haute température.

Commentaire :

Le graphique montre l'évolution de la perte de poids du béton avec différents teneurs en BAP (0 %, 5 %, 10 %) lorsqu'il est exposé à des températures élevées dans des échantillons prismatique 7*7*28. On observe une diminution progressive du poids avec l'augmentation de la température, en raison de l'évaporation de l'eau et de la décomposition des composants. Les bétons contenant du BAP présentent une perte de poids légèrement inférieure à certaines températures, suggérant une meilleure stabilité thermique. Toutefois, à 600°, les différences entre les formulations deviennent minimales, indiquant une limite d'efficacité du BAP à très haute température.

6.5 Perte de masse :

La perte de masse sert à quantifier l'eau sortant du matériau.

$$\text{Calcul perte de masse (\%)} = \frac{[M(\text{initial}) - M(\text{chauffe})]}{M(\text{initial})} \times 100$$

- **M(initial)** : masse du béton avant chauffage (à température ambiante),
- **M(chauffe')** : masse après exposition à haute température.

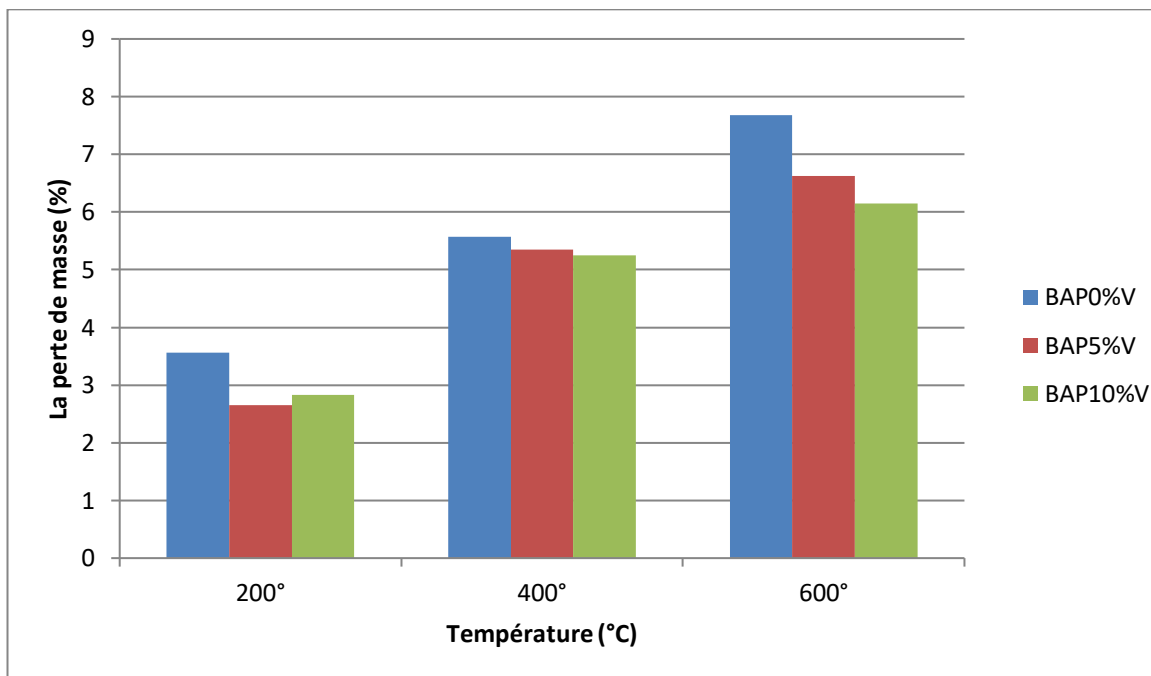


Figure 51 : Évolution de la perte de masse des BAP en fonction des températures.

Commentaire :

Ce graphique illustre la perte de masse du béton contenant différents pourcentages de BAP (0 %, 5 %, 10 %) soumis à des températures élevées. On constate une augmentation progressive de la perte de masse avec la température, reflétant la déshydratation et la décomposition des constituants. Les bétons avec BAP présentent une perte de masse légèrement inférieure, notamment à 600°, indiquant une meilleure stabilité thermique. Cela souligne l'effet bénéfique du BAP dans l'amélioration de la résistance du béton aux hautes températures.

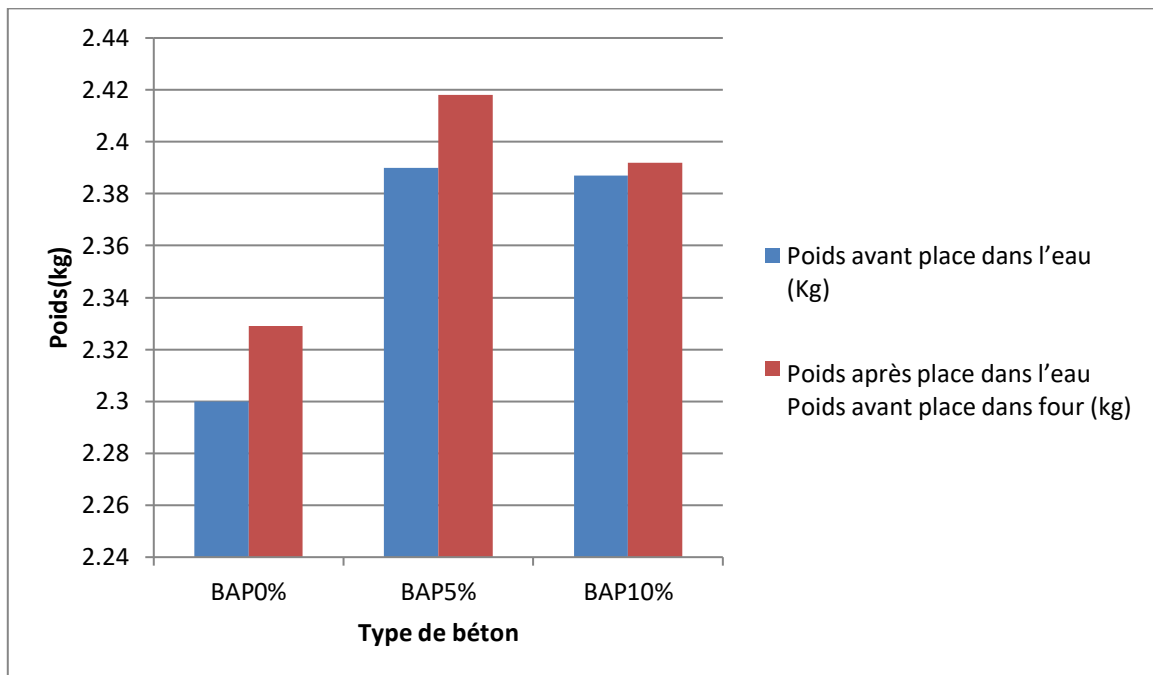


Figure 52 : Variation du poids du béton avant et après immersion dans l'eau pendant 30 jours

Commentaire :

Le graphique montre l'évolution du poids des bétons avec différents taux de poudre de verre (0 %, 5 %, 10 %) avant et après une conservation de plus de 30 jours dans l'eau. Une augmentation de poids est observée, indiquant l'absorption d'eau par la porosité capillaire. Le béton contenant 5 % de poudre de verre affiche une absorption légèrement plus élevée, probablement liée à une structure poreuse spécifique induite par l'ajout de verre. Toutefois, les variations restent faibles, suggérant une bonne résistance à la pénétration de l'eau.

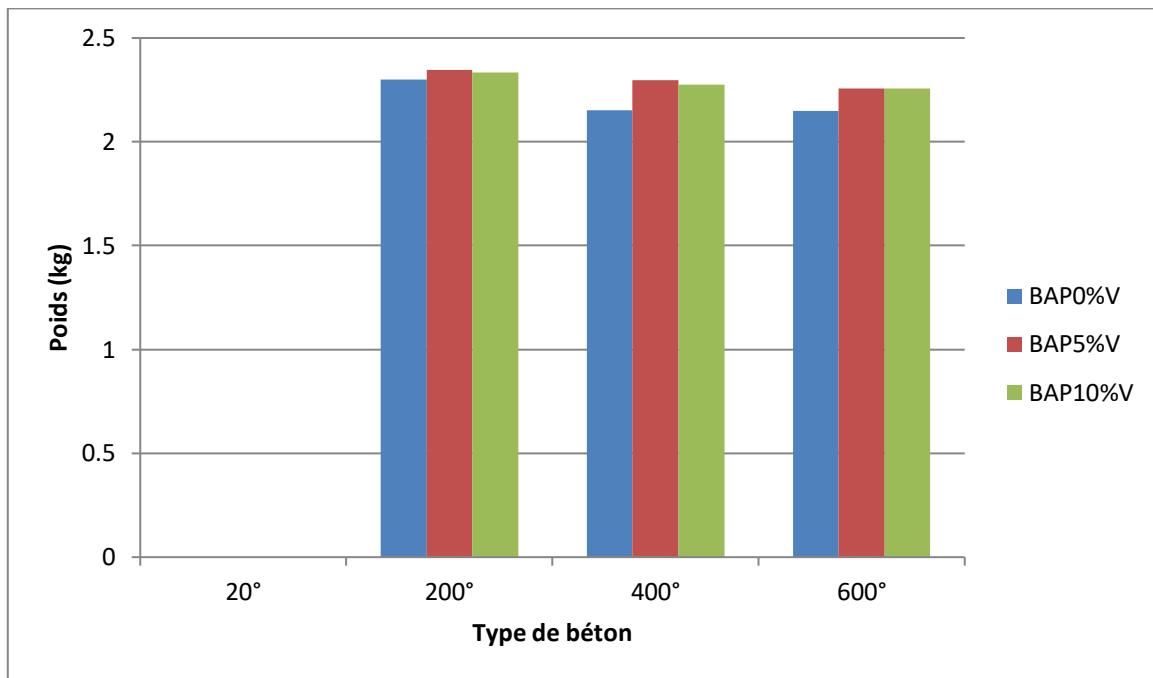


Figure 53 : Evolution de poids en fonction du type du béton exposé à la haute température.

Commentaire :

Le graphique montre que la perte de masse du béton augmente avec la température, en raison de l'évaporation de l'eau et de la dégradation des composants. L'ajout de poudre de verre à 5 % et 10 % réduit cette perte, indiquant une meilleure résistance thermique. Le béton sans poudre de verre présente la plus grande diminution de poids à haute température. Ces résultats soulignent l'efficacité des déchets de verre pour améliorer la stabilité thermique du béton.

Conclusion:

Ce chapitre présente les résultats de l'étude, leur analyse et interprétation. L'ajout de poudre de verre a montré une amélioration des propriétés rhéologiques avec l'augmentation du dosage. Dans l'état durci, une augmentation du dosage de la poudre de verre a également amélioré les performances mécaniques, notamment avec une combinaison optimale de 5% d'ajout. Cela a conduit à une meilleure résistance même avec l'exposition à des températures élevées. La poudre de verre a donc un impact significatif sur le comportement des BAP étudiés.

Conclusion Générale

Conclusion Générale:

En conclusion, les bétons autobloquants (BAP) représentent une avancée significative dans le domaine de la construction en béton, offrant des avantages économiques, techniques et environnementaux. Leur mise en place sans vibration permet de réduire les coûts, de construire des éléments complexes et de constituer une alternative aux bétons traditionnels. Cependant, leur formulation et le contrôle des propriétés nécessitent une attention particulière.

L'étude de l'influence du taux la nature des ajouts sur les propriétés mécaniques et rhéologiques des BAP a montré que l'utilisation de poudre de verre permet d'obtenir les meilleurs résultats, avec une résistance à la compression de 58 MPa à 400°

La méthode de formulation AFCG s'est révélée efficace pour formuler des BAP avec des ajouts, offrant les meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques. L'incorporation d'ajouts dans le béton autoplaçant n'a pas altéré ses propriétés, et la poudre de verre a donné les meilleurs résultats en termes d'étalement, de boîte en L et de résistance à la compression.

En conclusion, notre étude pratique a permis de mettre au point des formulations de BAP efficaces, en étudiant l'impact des ajouts sur les propriétés du béton. Et même avec l'exposition à des températures élevées la poudre de verre a donné les meilleurs résultats.

Références bibliographiques :

[1] **BOUDIAF SABRINA, MAHFOUDI INTISSAR.** L'effet de l'utilisation des déchets de poudre de verre et de marbre dans la formulation du béton autoplaçant à l'état frais et durcis, université Mohamed Boudiaf M'sila, juin 2024.

[2] **DJEBRI Noura.** Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant fibré à base de matériaux locaux exposé aux hautes températures. DOCTORATSCIENCES université Mohamed Boudiaf M'sila, Mai 2018.

[3] **AFGC,** «bétons autoplaçants-recommandations provisoires, documents scientifiques et technique, page 63, 2000.

[4] **MAEL A , XAVIER GH , CHRISTIAN M , DORIS N .,** « Lexique à l'usage des acteurs de la gestion des déchets , Collection « Référence » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat

Général au Développement Durable (CGDD) ,Mai 2012 .

[5] **EL HAFIANE S,** Gestion des déchets solides au niveau de la Commune Urbaine d'Agadir et leur impact sur le milieu naturel, mémoire de fin d'étude, Marrakech , mars 2012

[6] **FEBELCEM – Fédération de l'Industrie Cimentière Belge,** « Les bétons autoplaçants », Bruxelles, août 2005

[7] **BAALBAKIM,** "Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons : Importance du mode d'interaction des adjuvants", Thèse de Doctorat ,Université de Sherbrooke, Québec. Septembre 1998.

[8] **BENKHALFA Khalid ,ZALANI Mohammed.** Comportement du béton autoplaçant à haute température, Mémoire Master Université de Guelma 8 Mai 1945. Juin 2015

[9] **NF EN 12350 – 8.,** juin 2019. Partie 8 : Béton autoplaçant – essai d'étalement au cône d'Abrams.

[10] **NF EN 12350 – 10,** Novembre 2010. Partie 10 : Béton autoplaçant – essai à la boîte en L.

[11] **NF EN 12350 – 11.,** Novembre 2010. Partie 11 : Béton autoplaçant – essai de stabilité au tamis.

- [12] NF EN 206 – 9., Juin 2010. Béton: partie 9 : Règles complémentaires pour le béton autoplaçant.
- [13] Sedran T., 1999. Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants, Thèse de Doctorat de l'ENPC. 220p.
- [14] Roussel N., 2007. The LCPC Box cheap and simple technique for yield stress measurement of SSC, Materials and structures. Vol. 40 (9), 889-896.
- [15] NF EN 12390-3., Avril 2012. Essai pour béton durci: Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes.
- [16] (NF EN 12390-5) Octobre 2001. Essai pour béton durci Partie 5: Résistance à la flexion sur éprouvettes.
- [17] Chatra Yassine. effet des fillers de calcaire sur le comportement d'un béton autoplaçant (BAP) à base des matériaux locaux, mémoire master, université Mohamed Boudiaf M'sila, juin 2016
- [18] TURCRY .PH, LOUKILI. A, "Différentes approches pour la formulation des BAP", Revue Française de Génie Civil, Vol7, N°4, 2003.
- [19] BAALBAKIM, "Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons : Importance du mode d'interaction des adjuvants", Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, Québec. Septembre 1998.
- [20] Essais de caractérisation spécifiques au BAP Essais de caractérisation spécifiques au BAP NOVEMBRE 2018. <https://www.infociments.fr/betons/essais-de-caracterisation-specifiques-au-bap>.

- [21] **Ademe (1996).** "La collecte et le traitement des déchets." Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
- [22] **Ait Mamer Chahrazed et Kechout Aghilas** « Contribution à l'étude de l'état de la gestion des déchets ménagers et assimilés dans la commune de **Tizi-Ouzou.** » mémoire de fin d'étude Spécialité : Gestion des déchets Solides. **Département de Science Biologique UMMTO.** (Année 2015/2016)
- [23] **BENHANIA HAMZA /GASMI YUCEF.** Valorisation des déchets composites UNIVERSITE KASDI-MERBAH OUARGLA juin 2022
- [24] **Mehdi C .,** «Les déchets de chantier et le recyclage des matériaux dans le secteur du bâtiment» thèse de fin de formation 2007
- [25] **STAMBOULIM .,** « Valorisation de débris de verre dans les infrastructures routières : Application au verre industriel, verre ménager et verre mixte », Mémoire de master recherche 2016 .
- [26] **CHELABI H , TALEB Z .,** « Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre ». Mémoire de master, université de bouira2017
- [27] **MAEL A , XAVIER GH , CHRISTIAN M , DORIS N .,** « Lexique à l'usage des acteurs de la gestion des déchets , Collection « Référence » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) ,Mai 2012 .
- [28] **EL HAFIANE S,** Gestion des déchets solides au niveau de la Commune Urbaine d'Agadir et leur impact sur le milieu naturel, mémoire de fin d'étude, Marrakech , mars 2012
- [29] **NIGRI G .,** « Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique », thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2018.
- [30] **BELKBIR H .,** « Elaboration d'un béton autoplaçant léger à base des déchets deplastique», mémoire de DEUA, Université de Boumerdes, 2011.
- [31] **La Chimie chez Dr Sahar** mardi 5 août 2014
<http://chimiedrsahar.blogspot.com/2014/08/generalites-sur-les-verres.html>

Références bibliographiques

- [32] Aloueimine S O., (2006), méthodologie de caractérisation des déchets ménagers à Nouakchott (Mauritanie) : Contribution à la gestion des déchets et outils d'aide la décision. Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, 195p
- [33] **KHEMISSI R.**, « Caractérisation et choix d'une filière de traitement des déchets ménagers et assimilés de la ville d'Oran » thèse de Magister Université d'Oran, 2014.
- [34] [Touidjine, 2011] Touidjine K., Le béton sous haute température - Avis d'expert, <http://www.batiactu.com/edito/le-beton-sous-haute-temperature--28201.php>, 2011.
- [35] [Denoël, 2007] Denoël I.J.-F., Sécurité incendie et constructions en béton, FEBELCEM Fédération de l'industrie cimentière belge, Rue Volta 8,1050 Bruxelles, 2007.
- [36] [Divet et al., 2005] Divet L., Arnaud S., Derobert X., Fasseu P., Faure R.-M., Larive C., Naquin B., Olivier G., Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie - Méthodes d'essai n° 62, techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 2005.
- [37] **HACHEMI Samya.** Etude du Comportement du béton soumis à haute température : Influence du type de béton et de la nature des constituants Université Mohamed Khider – Biskra 2015.
- [38] **GHARBI FAYZA / FALI MALIKA** Evaluation de la qualité des bétons auto -plaçant (BAP) exposés à haute température aux moyens des essais non-destructifs (END)et essais direct UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2019
- [39] **Hager, I.** "Comportement à Haute Température Des Bétons à Haute Performance - évolution Des Principales Propriétés Mécaniques." Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie. 2004.
- [40] **Van Thai NGUYEN-** Thèse de Doctorat Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température : application à des éprouvettes de grandes dimensions
- [41] **Melle. KAOUANE Malika-** Mémoire de Magister Analyse des contraintes mécaniques et de la fissuration des éléments en béton armé sous l'effet thermomécanique. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI OUZOU.2011
- [42] [Bazant et Kaplan, 1996] Bazant Z.P., Kaplan M.F., Concrete at High temperatures, Material properties and mathematical models, Concrete Design & Construction Series, Longman Group Limited, 1996.

Références bibliographiques

- [43] **ZOUBIRI AMINA** Comportement du béton à base de la poudre de verre à hautes températures Effet de l'âge Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2016
- [44] **ROUINA, Mouad Abd El Djalil.** Propriétés rhéologiques des bétons autoplaçants contenant des ajouts minéraux. 2020.
- [45] **DJEBRI, Nora, RAHMOUNI, Zine El Abidine, et BELAGRAA, Larbi.** Experimental Investigation on the Effect of Marble powder on the performance of Selt-Compacting Concrete (SCC). Mining Science, 2017, vol. 24, p. 183-194.
- [46] **Gouilliard, S. et Legendre, A., (2003),** Déchets ménagers, Ecologie, environnement industriel et développement soutenable, Economica, Paris, Guérande

Référence des photos

- [1] <https://picardierecup.com/1352/comment-les-dechets-de-constructions-sont-recycles/>
- [2] <https://casabaia.ma/casablanca-les-projets-prevus-en-2023-pour-completer-la-nouvelle-decharge-controlee/>
- [3] <https://www.la-croix.com/France/Drame-tunnel-Mont-Blanc-1999-tournant-matiere-securite-2019-03-22-1301010636>

Annexes

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	2.6 – 3.7
Teneur en sulfates (SO ₃)	2.2 – 2.8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 – 2.8
Teneur en Chlorures (Cl ⁻)	0.03 – 0.07
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	valeur
C ₃ S	56 – 66
C ₃ A	5.1 – 7.2
Propriétés physiques	valeur
Consistance normale (%)	25.8 – 26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25 – 1.0
Temps de prise (min)	valeur
Début de prise	150 – 190
Fin de prise	220 – 250
Résistance à la compression	valeur
2 jours (MPa)	20 – 29
28 jours (MPa)	42.5 – 52.5



Références bibliographiques

